



В. В. Белага
И. А. Ломаченков
Ю. А. Панебратцев

ФИЗИКА

ФИЗИКА

11



БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ



**В. В. Белага
И. А. Ломаченков
Ю. А. Панебратцев**

ФИЗИКА

11 класс

Базовый уровень

Учебник

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное

Москва
«Просвещение»
2022



УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721
Б43

Серия «Сферы» основана в 2003 году

На учебник получены **положительные** заключения **научной** (заключение РАО № 1176 от 18.11.2016 г.), **педагогической** (заключение РАО № 1067 от 21.11.2016 г.) и **общественной** (заключение РКС № 443-ОЭ от 22.12.2016 г.) экспертиз.

Издание выходит в pdf-формате.

Белага, Виктория Владимировна.

Б43 Физика : 11-й класс : базовый уровень : учебник : издание в pdf-формате / В. В. Белага, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев. — 4-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 239, [1] с. : ил. — (Сферы).

ISBN 978-5-09-101620-8 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-095833-2 (печ. изд.).

Данный учебник завершает линию учебно-методических комплексов «Сферы» по физике. Издание подготовлено в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования. Материал учебника направлен на формирование научных представлений о физических законах и явлениях и основывается на достижениях современной физики и техники. Главными особенностями данного учебника являются фиксированный в тематических разворотах формат, лаконичность и жёсткая структурированность текста, разнообразный иллюстративный ряд.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-09-101620-8 (электр. изд.)
ISBN 978-5-09-095833-2 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2019
© Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2019
Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

Работаем с учебником 6

РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

Электричество и магнетизм — великое объединение 7

Глава 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

1. Магнитные взаимодействия 10
2. Магнитное поле. Индукция магнитного поля 12
3. Сила Ампера 14
4. Действие магнитного поля на движущиеся заряды.
Сила Лоренца 16
5. Электромагнитная индукция 18
6. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции 20
7. Индукционное электрическое поле 22
8. Самоиндукция. Энергия магнитного поля 24
- Решение задач 26
- Подведём итоги 28

РАЗДЕЛ II. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

От маятника к электромагнитным полям 29

Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

9. Механические колебания. Характеристики
колебательного движения 32
10. Пружинный и математические маятники.
Гармонические колебания 34
11. Превращение энергии колебаний.
Затухающие колебания 36
12. Решение уравнений свободных гармонических
колебаний 38
13. Вынужденные колебания. Резонанс 40
- Решение задач 42
- Подведём итоги 44

Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

14. Электромагнитные колебания 46
15. Вынужденные электромагнитные колебания.
Переменный ток 48
16. Уравнение свободных гармонических колебаний
в контуре. Формула Томсона 50
17. Мощность переменного тока. Действующие
значения тока и напряжения 52
18. Производство и потребление электроэнергии 54
19. Передача электрической энергии. Трансформатор 56
- Решение задач 58
- Подведём итоги 60

Глава 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

20. Волновые явления 62
21. Длина волны. Скорость распространения волн 64
22. Звуковые колебания и волны. Свойства звука 66
23. Интерференция волн. Дифракция волн 68
- Подведём итоги 70

Глава 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

24. Электромагнитные волны 72
25. Экспериментальное открытие электромагнитных волн 74
26. Изобретение радио. Принципы радиосвязи 76
- Подведём итоги 78



РАЗДЕЛ III. ОПТИКА

Свет и цвет 79

Глава 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

27. Световые лучи. Отражение света	82
28. Преломление света	84
29. Полное внутреннее отражение света.....	86
30. Плоское зеркало. Линзы	88
31. Глаз как оптическая система	92
32. Оптические приборы.....	94
Решение задач	98
Подведём итоги	100

Глава 7. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ. ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ

33. Скорость света	102
34. Дисперсия света	104
35. Принцип Гюйгенса. Законы отражения и преломления световых волн	106
36. Интерференция света.....	108
37. Дифракция света.....	110
38. Примеры использования интерференции и дифракции света	112
39. Поперечность световых волн. Поляризация света.....	114
40. Цвет	116
41. Виды спектров. Спектральный анализ.....	118
42. Спектр электромагнитных излучений	120
Решение задач	122
Подведём итоги	124

РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

От классической физики к теории относительности 125

Глава 8. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

43. Постулаты специальной теории относительности. Одновременность	128
44. Преобразования Галилея и преобразования Лоренца	130
45. Лоренцево сокращение длины. Замедление времени	132
46. Релятивистский закон сложения скоростей	134
47. Четырёхмерное пространство—время	135
48. Релятивистские масса, энергия, импульс	136
Решение задач	138
Подведём итоги	140

РАЗДЕЛ V. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Физика микрокосмоса 141

Глава 9. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. АТОМНАЯ ФИЗИКА

49. Фотоэлектрический эффект. Законы фотоэффекта	144
50. Квантовая гипотеза Планка. Квантовая теория фотоэффекта	146
51. Давление света. Волновые и корпускулярные свойства света	148
52. Модели строения атома. Опыт Резерфорда	150
53. Атом Бора	152
54. Атом и квантовая механика	154
55. Лазер	156
Решение задач	158
Подведём итоги	160

Глава 10. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

56. Радиоактивность	162
57. Радиоактивные превращения. Закон радиоактивного распада	164
58. Состав и строение атомного ядра	166
59. Ядерные силы. Ядерные реакции	168
60. Энергия связи атомных ядер. Энергетический выход ядерных реакций	170
61. Ядерные реакции деления. Цепные ядерные реакции	172
62. Ядерный реактор. Атомная энергетика	174
63. Термоядерные реакции	176
64. Влияние радиоактивного излучения на живые организмы. Дозиметрия	178
65. Элементарные частицы	180
66. Фундаментальные взаимодействия и классификация элементарных частиц.....	182
67. Приборы для наблюдения и регистрации элементарных частиц.....	184
Решение задач	186
Подведём итоги.....	188

РАЗДЕЛ VI. АСТРОНОМИЯ (ВСЕЛЕННАЯ)

Физика макрокосмоса.....	189
--------------------------	-----

Глава 11. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

68. Развитие представлений о строении мира. Законы движения планет	192
69. Физические величины и их измерение в астрономии	194
70. Строение Солнечной системы	196
71. Солнце.....	200
72. Звёзды.....	204
73. Строение и эволюция звёзд	206
74. Галактики.....	208
75. Рождение и эволюция Вселенной.....	212
76. Современные методы исследования Вселенной.....	216
Решение задач	220
Подведём итоги.....	222

Заключение.....	223
-----------------	-----

Лабораторные работы	224
---------------------------	-----

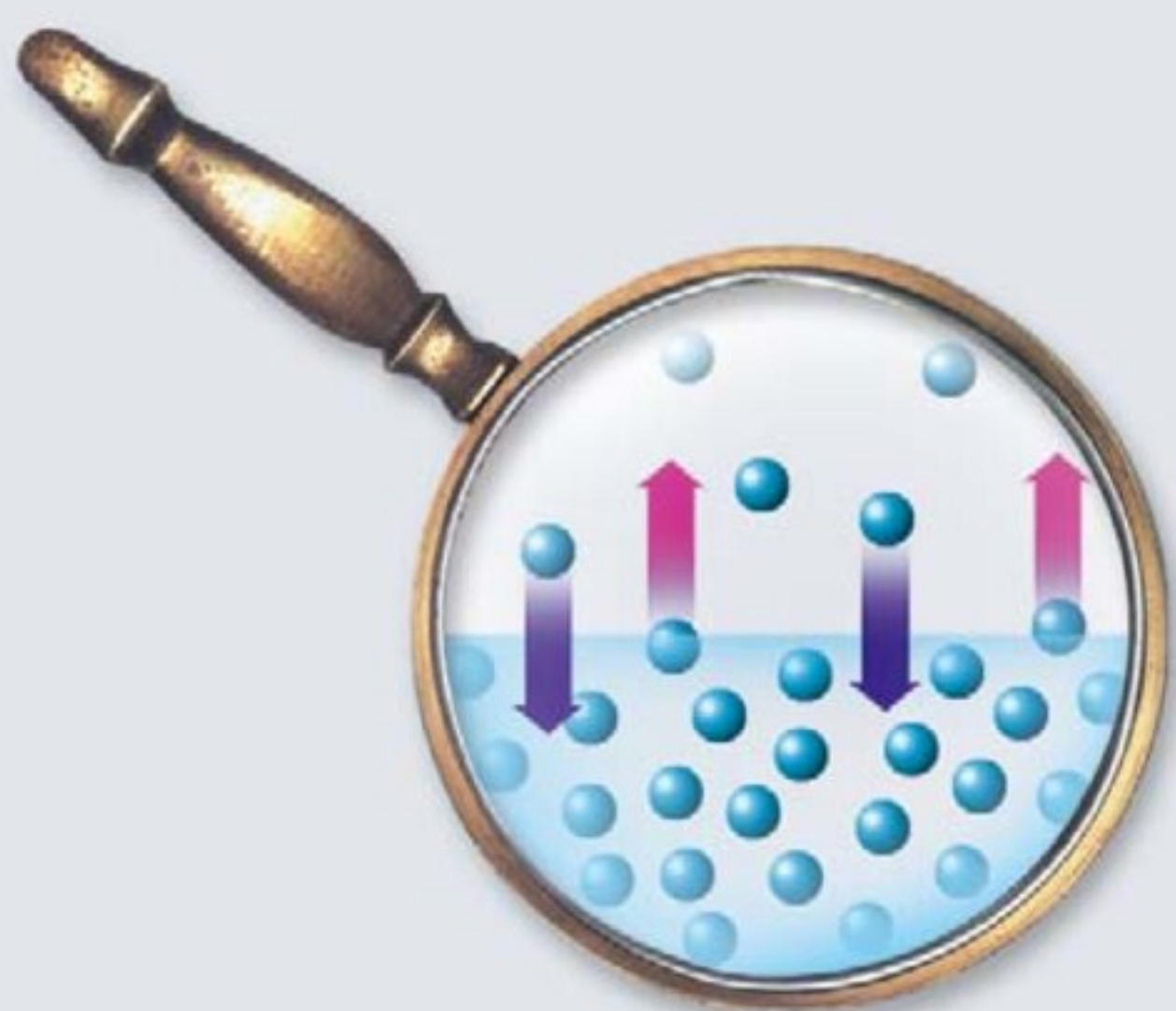
Предметно-тематический указатель	235
--	-----

Физический
блокнот



Физический калейдоскоп

ВНИМАНИЕ!



РАБОТАЕМ С УЧЕБНИКОМ

Материал учебника включает 11 тем, каждая из которых разделена на параграфы. Перед каждой темой в рубрике «Коротко о главном...» приводится высказывание одного из великих учёных, которое отражает суть содержания темы.

Параграф начинается с вводных рубрик «Вы узнаете...», «Вспомните...». Рубрика «Вы узнаете...» познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика «Вспомните...» подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, для того чтобы усвоить новый.

Основной текст параграфа сопровождают рубрики, которые помогут вам глубже понять наиболее важный материал.

В рубрике «Физический блокнот» содержатся интересные сведения и дополнительная информация к основному тексту параграфа.

Рубрика «Физический калейдоскоп» иллюстрирует текст параграфа примерами из жизни и техники.

Физические законы и формулы параграфа выделены в рубрике «Внимание!».

Графический элемент в виде лупы акцентирует ваше внимание на внутреннем содержании рисунка, детализирует изображение физического явления или процесса.

В темах, в которых необходимо более подробно рассмотреть решение физических задач, содержится раздел «Решение задач».

В параграфе также даны ссылки в виде стрелок. Они показывают, что изучение данного материала невозможно без использования задачника или тетради-практикума.



Завершают параграф вопросы, ответы на которые помогут вам закрепить изученный материал и проверить свои знания.

На последней странице каждой главы содержатся рубрики «Подведём итоги», «Вопросы для обсуждения» и обобщающие схемы, позволяющие представить материал главы в единстве и взаимосвязи в лаконичной форме.

В рубрике «Подведём итоги» приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе.

Вопросы, содержащиеся в рубрике «Вопросы для обсуждения», носят проблемный характер и могут стать интересной темой для дискуссии.

Ссылки на интернет-ресурсы и литературу позволяют привлечь дополнительные источники информации при изучении темы.



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ — ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



РАЗДЕЛ I

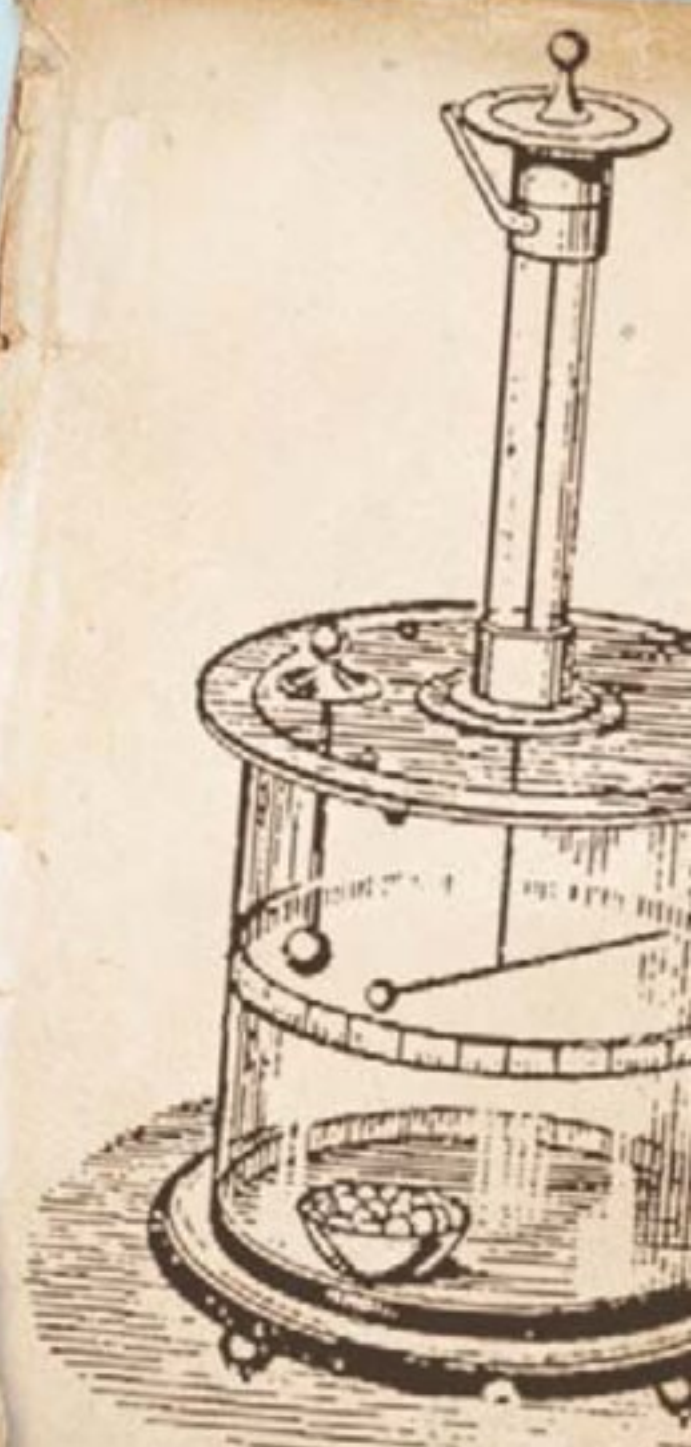
Когда-то люди считали, что падение яблока на Землю и движение Луны вокруг Земли — это разные физические явления, подчиняющиеся различным законам. Однако гениальный И. Ньютон, наблюдая за падением яблока и за движением Луны, объединил эти явления, предложив для их описания закон всемирного тяготения. Это было первое великое объединение в физике. Вторым великим объединением в физике стало объединение электричества и магнетизма. И в этом огромная заслуга гениального физика-экспериментатора М. Фарадея и гениального физика-теоретика Д. Максвелла.

Всего двести лет назад, в начале XIX в., очень мало было известно и о природе магнитных явлений. И ещё меньше — о связи электричества и магнетизма. Первым, кто «обратил электричество в магнетизм», был голландский учёный Х. Эрстед. В истории физических открытий говорится, что в 1820 г. Эрстед во время лекции для студентов, в которой он рассказывал о магнетизме и различных видах электричества, провёл следующий опыт. Он поместил компас вблизи от проволоки, проходившей параллельно стрелке компаса. И когда по проволоке пошёл ток от батареи, стрелка компаса отклонилась на 90° и приняла направление «восток—запад». Фактически этот простой опыт обнаружил связь между электричеством и магнетизмом и послужил началом развития одного из важнейших разделов физики — электромагнетизма.

Открытие Эрстеда послужило толчком для новых важных открытий и изобретений. Уже в том же 1820 г. французский физик и астроном Д. Араго изобрёл электромагнит, пропустив ток через проволоку, намотанную на железный стержень. Другой французский учёный А. Ампер пришёл к заключению, что параллельные токи притягиваются, и подтвердил это экспериментально.

Одним из величайших экспериментаторов по праву считают английского учёного М. Фарадея. Историк науки Г. Липсон в своей книге «Великие эксперименты в физике» пишет, что, в отличие от других великих учёных — современников Фарадея, «открытия которых представляли собой отдельные «пики», Фарадей воздвиг «горную цепь» из взаимосвязанных работ. Начав исследовать какой-либо вопрос, Фарадей с гениальной способностью определял основные направления поиска... У Фарадея был инстинкт, помогавший ему свести вместе звенья какого-нибудь вопроса и создать из них законченное целое». Фарадей считал, что если электричество создаёт магнетизм, то и магнетизм должен создавать электричество. Эксперименты Фарадея увенчались успехом в 1831 г., т. е. спустя 11 лет после открытия Эрстеда. При помощи достаточно простого прибора он сделал своё великое открытие — открытие электромагнитной индукции.

Опыт Фарадея состоял в следующем. На железное кольцо наматывались две отдельные спирали. Одна из спиралей подсоединялась к батарее, а другая — к гальванометру. При замыкании первой цепи наблюдалось резкое отклонение стрелки гальванометра, а





при размыкании цепи стрелка отклонялась в противоположную сторону. Этот опыт Фарадей проводил различными способами, и всегда ему удавалось «получить электричество из магнетизма». В направлении, указанном Фарадеем, работали многие физики того времени. Один из них, американец Д. Генри, открыл электромагнитную индукцию независимо, но к тому времени, когда стало известно об открытии Фарадея, ещё не успел опубликовать результаты своей работы. Ещё одной заслугой Генри стало открытие явления самоиндукции, суть которого состоит в том, что при появлении и прекращении тока, текущего через катушку, в самой катушке наводится электродвижущая сила. Фарадей встретился с рядом затруднений при формулировке общего правила для определения направления индуцированных токов. Этому вопросу были посвящены исследования молодого профессора Петербургского университета Э.Х. Ленца. Ленц провёл и описал большое количество экспериментов, на основании которых сформулировал правило, носящее сейчас его имя.



Анализируя результат опытов по исследованию взаимосвязи электрических и магнитных явлений, Фарадей в 1852 г. написал: «Многие силы очевидным образом обнаруживаются на расстоянии; их физическая природа для нас непостижима — всё же мы можем узнать о них много реального и положительного, в том числе можем до известной степени уяснить себе состояние пространства между телом, которое оказывает действие, и телом, на которое оказывается действие, или между взаимодействующими телами. Такие силы представляются нам в явлениях тяготения, света, электричества, магнетизма и т.д.». Фактически Фарадей пришёл к новой фундаментальной физической идее электрического и магнитного поля и соответствующих им силовых линий. Он писал, что все экспериментальные факты «указывают на существование физических силовых линий как вне, так и внутри магнитов... Вокруг магнита должно существовать и им поддерживаться некоторое состояние... и это состояние доказывает физическую природу линий магнитной силы». Во времена Фарадея не было никаких оснований считать, что магнетизм и свет как-то связаны между собой. Однако Фарадей стал исследовать прохождение света через магнитное поле и обнаружил, что магнитное поле оказывает воздействие на характер распространения света. В дальнейшем стало понятно, что свет — электромагнитная волна.



Английский учёный Дж. Максвелл был замечательным математиком и сумел перевести идеи Фарадея на язык математической теории. В 1864 г. им была создана теория электромагнитного поля, которая фактически завершила великое объединение электричества и магнетизма в виде четырёх уравнений, которые носят его имя.

Сегодня известно, что электромагнитные взаимодействия лежат в основе огромного количества явлений окружающего нас мира. Они являются одними из четырёх фундаментальных взаимодействий, которым подчиняются все объекты Вселенной. Электромагнитные взаимодействия всеобъемлющи — они действуют и в микромире, и в макромире. Электромагнитные силы связывают атом в единое целое, а свет Солнца и звёзд — это электромагнитные волны.



Глава 1

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРО- МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

- МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
- МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
- СИЛА АМПЕРА
- ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ. СИЛА ЛОРЕНЦА
- ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ
- ПРАВИЛО ЛЕНЦА. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ
- ИНДУКЦИОННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
- САМОИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ I



ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Нужно было обладать могучим даром научного воображения, чтобы распознать, что в описаниях электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а, скорее, пространство (электрическое поле) между зарядами и частицами.

А. Эйнштейн о М. Фарадее

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что нового в изучении явлений магнетизма дали опыты Эрстеда и Ампера.
- В чём заключается гипотеза Ампера и какова природа магнетизма.
- На чём основано введение единицы силы тока в СИ.

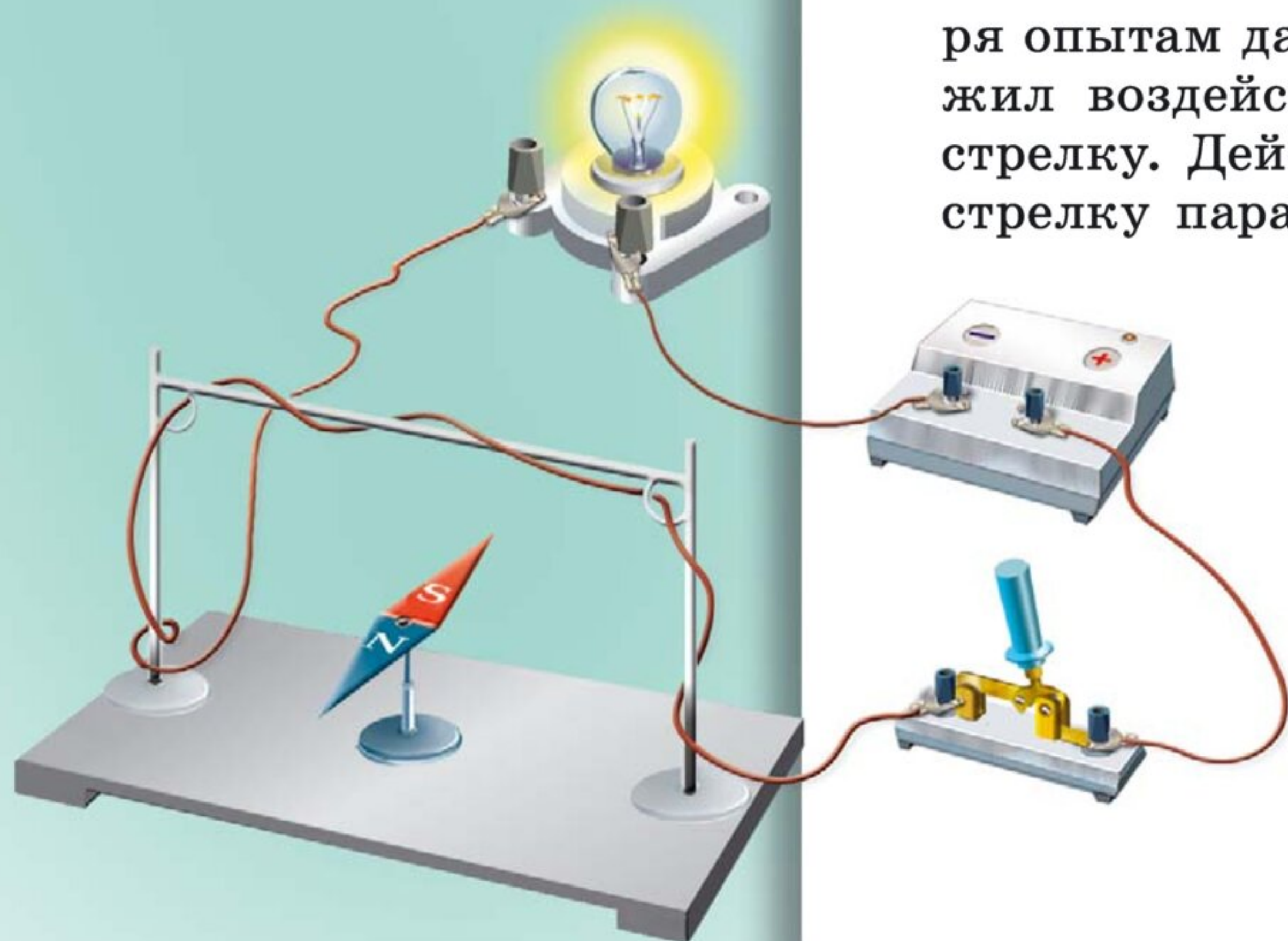
ВСПОМНИТЕ:

- Как взаимодействуют электрические заряды?
- Как взаимодействуют постоянные магниты?
- Что такое сила тока и в каких единицах она измеряется?



Ганс Христиан Эрстед
(1777—1851)

Датский физик, исследователь электромагнетизма.



МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Хотя магнитные явления были известны людям с глубокой древности, последовательное изучение природы магнетизма стало возможным только после того, как научились получать электрический ток.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Несмотря на многообразие проявлений электрических и магнитных взаимодействий, ничто не указывало на их взаимосвязь. Тела приобретают способность к электрическим взаимодействиям при их натирании, например янтаря мехом, а магнитными свойствами некоторые минералы обладают изначально. При этом магнитные свойства не исчезают с течением времени в отличие от свойства тел быть наэлектризованными. И хотя магниты могут как притягиваться, так и отталкиваться, подобно зарядам, отделить северный магнитный полюс от южного полюса не удаётся ни при каких обстоятельствах.

Особенности поведения магнитов подробно изучил и систематизировал английский учёный У. Гильберт в конце XVI в. В частности, он первым догадался, что земной шар представляет собой громадный природный магнит, оказывающий воздействие на магнитную стрелку.

В конце XVIII в. в изучении электрических и магнитных явлений появились первые количественные законы. Французскому физiku Ш. Кулону удалось измерить силу взаимодействия между двумя заряженными шариками, а также силу, действующую между двумя магнитными зарядами-полюсами. Полученные из опыта закономерности одинаково определяли притяжение и отталкивание соответствующих электрических зарядов и зарядов-полюсов магнитов. Это указывало на какую-то общность электрических и магнитных явлений.

ОПЫТЫ ЭРСТЕДА И АМПЕРА

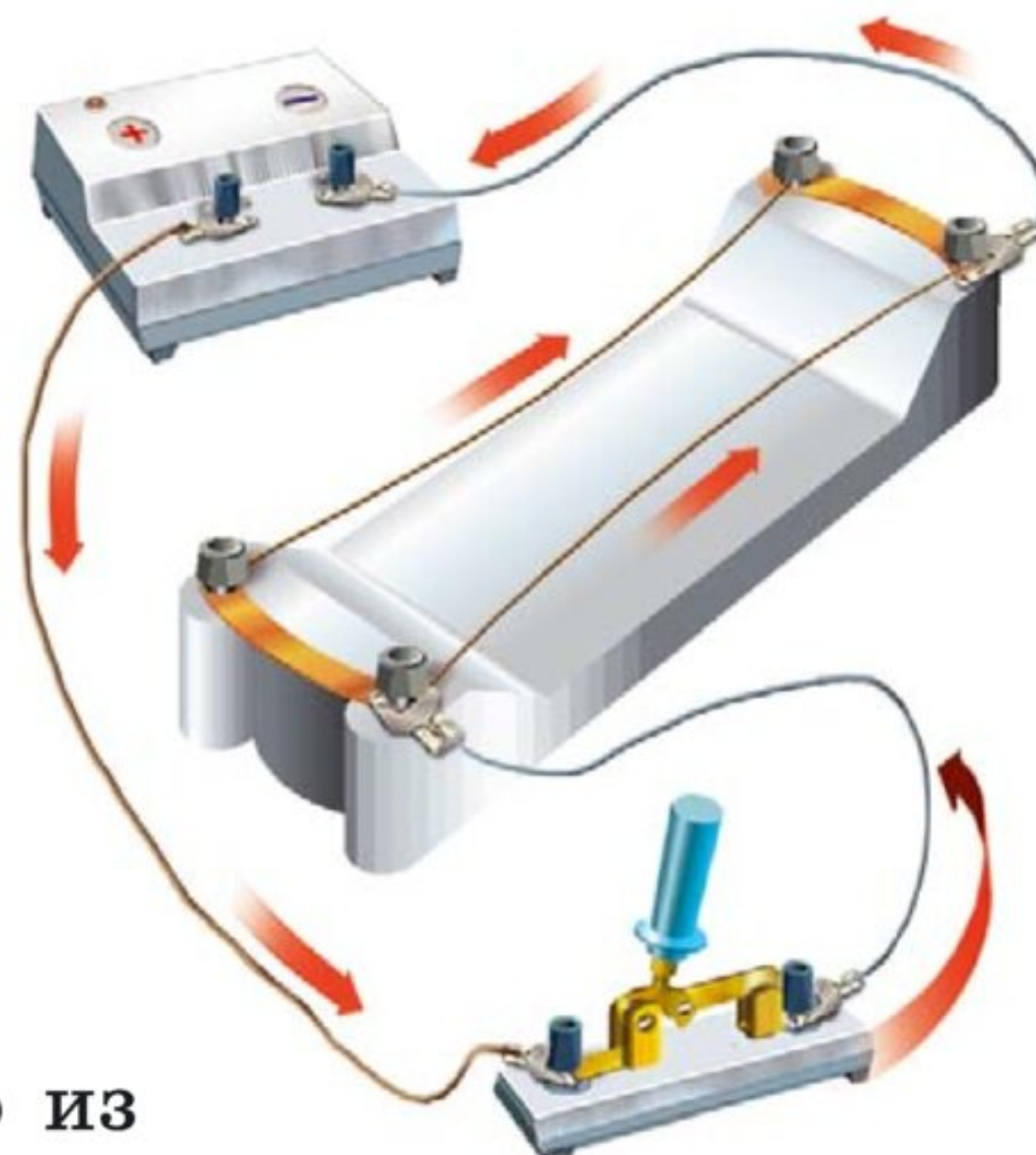
Решающий поворот в изучении явлений магнетизма произошёл в 1820 г. благодаря опытам датского физика Г. Эрстеда, который обнаружил воздействие электрического тока на магнитную стрелку. Действительно, если расположить магнитную стрелку параллельно проводу, то при пропускании по нему электрического тока стрелка поворачивается и устанавливается перпендикулярно проводнику.

Опыт Эрстеда наглядно свидетельствовал о том, что в пространстве, окружающем проводник с током, появляются силы, которые воздействуют на магнитную стрелку.

Изучение магнитных взаимодействий продолжил французский физик и

математик А. Ампер, который в том же 1820 г. установил, что два гибких проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение, если через них пропустить электрический ток в одном направлении. При противоположных направлениях токов проводники взаимно отталкиваются.

В случае когда в каком-либо из проводников ток отсутствует, проводники друг на друга не действуют.



ГИПОТЕЗА АМПЕРА Опыты по взаимодействию проводников с током невозможно объяснить взаимодействием электрических зарядов, поскольку каждый из проводников электрически нейтрален.

Проанализировав большое количество опытных данных по взаимодействию магнитов, а также воздействие магнита на проводник с током, Ампер выдвинул гипотезу, что магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами, циркулирующими внутри самого тела. Иначе говоря, был сделан вывод, что «все магнитные явления сводятся к чисто электрическим эффектам».

Согласно гипотезе Ампера в любом магните имеется множество круговых элементарных токов, ориентированных строго определённым образом, в результате чего их действия складываются. Отсутствие у вещества магнитных свойств означает, что эти токи циркулируют по отношению друг к другу неупорядоченно и их действия взаимно компенсируются.

Гипотеза Ампера свидетельствовала о его большой научной смелости как учёного, поскольку в первой четверти XIX в. ещё ничего не знали ни о строении атома, ни о существовании электрона.

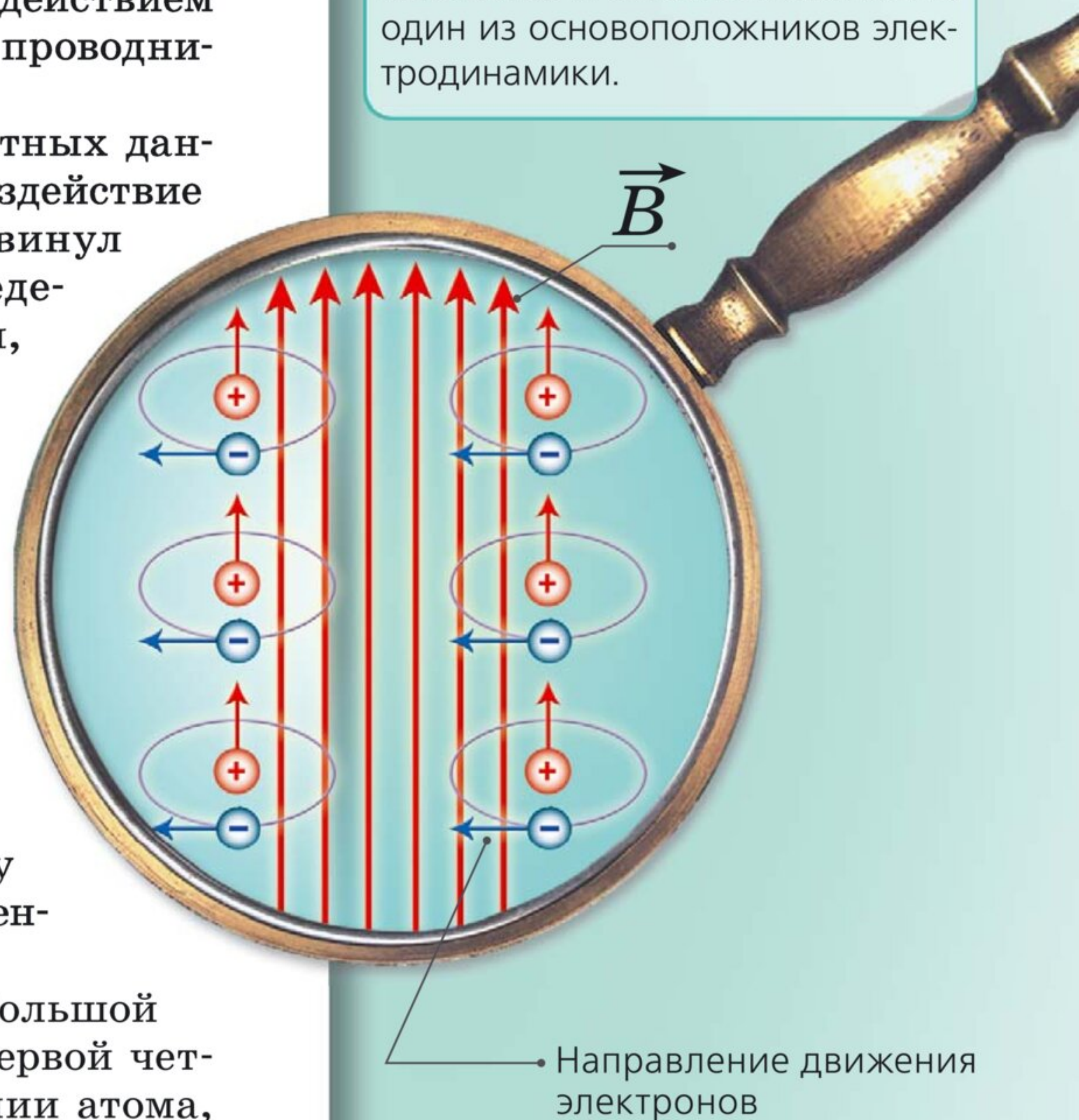
ЕДИНИЦА СИЛЫ ТОКА В 1948 г. на Международной конференции по мерам и весам было принято решение о том, что единица силы тока должна определяться через магнитное взаимодействие двух очень длинных и тонких линейных проводников с током, находящихся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга.

За единицу силы тока принимают силу тока, при которой между этими проводниками возникает сила магнитного взаимодействия, равная $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины проводника. Эту единицу силы тока в честь учёного назвали *ампером* (А).



Андре-Мари Ампер
(1775—1836)

Французский физик, знаменитый математик и естествоиспытатель, один из основоположников электродинамики.



Направление движения электронов

ВОПРОСЫ:

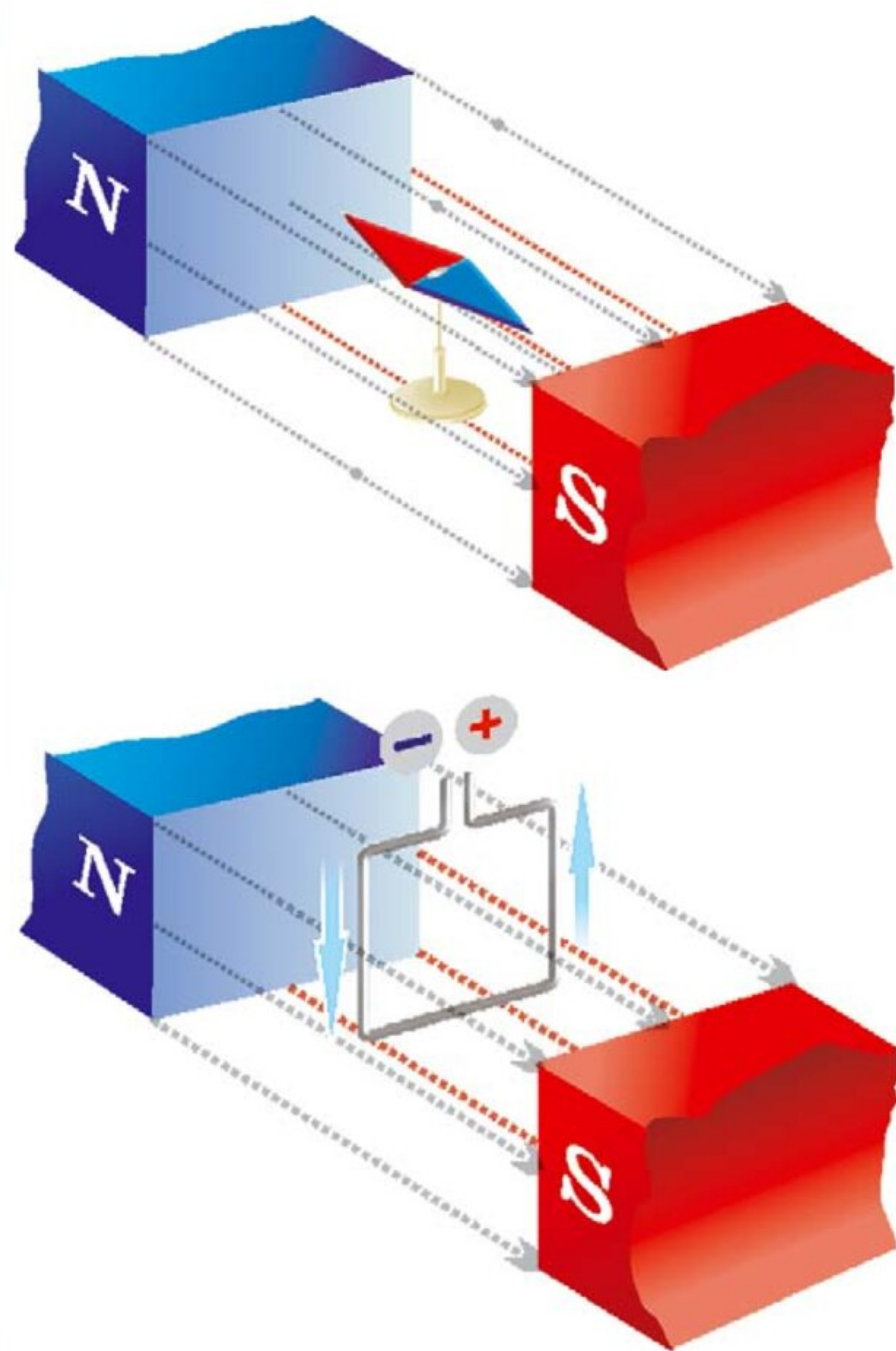
- Имеются ли различия между электрическими и магнитными явлениями?
- Можно ли утверждать, что магнетизму присуща своя особая природа, не связанная с существованием электрических зарядов?
- Какой главный вывод можно сделать на основе гипотезы Ампера?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключается главная особенность магнитного поля.
- Какая физическая величина является силовой характеристикой магнитного поля.
- Что такое линии магнитной индукции.
- Как определяется модуль магнитной индукции.

ВСПОМНИТЕ:

- Что является источником магнитного поля?
- Как графически изображается магнитное поле?
- В чём заключается правило правого буравчика?
- В чём заключается правило левой руки?



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Опыты Эрстеда и Ампера наглядно свидетельствовали о появлении вокруг проводников с током сил, действующих как на магнитную стрелку, так и на ток. Эти силы называют магнитными и порождаются магнитным полем. Магнитное поле обладает определёнными свойствами, которые устанавливают экспериментально.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ Как известно, вокруг заряженных тел существует электрическое поле. Аналогично в пространстве, окружающем проводники с током, возникает поле, называемое **магнитным**.

Это поле материально и непрерывно в пространстве, оно существует независимо от наших знаний о нём. Сложившиеся представления о свойствах магнитного поля вырабатывались на основе опытов по его воздействию на магнитную стрелку и на движущиеся заряды.

Главной особенностью магнитного поля является тот факт, что оно порождается только движущимися зарядами (токами) и оказывает воздействие только на движущиеся заряды (токи).

На покоящиеся заряды магнитное поле, в отличие от электрического поля, не действует.

Чтобы более предметно говорить о свойствах магнитного поля, необходимо ввести физическую величину, которая может служить количественной характеристикой этого поля.

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ Нетрудно осуществить опыт по воздействию магнитного поля на магнитную стрелку, помещённую между полюсами подковообразного магнита. При этом магнитная стрелка устанавливается в определённом положении. Это говорит о том, что магнитное поле оказывает на стрелку ориентирующее воздействие.

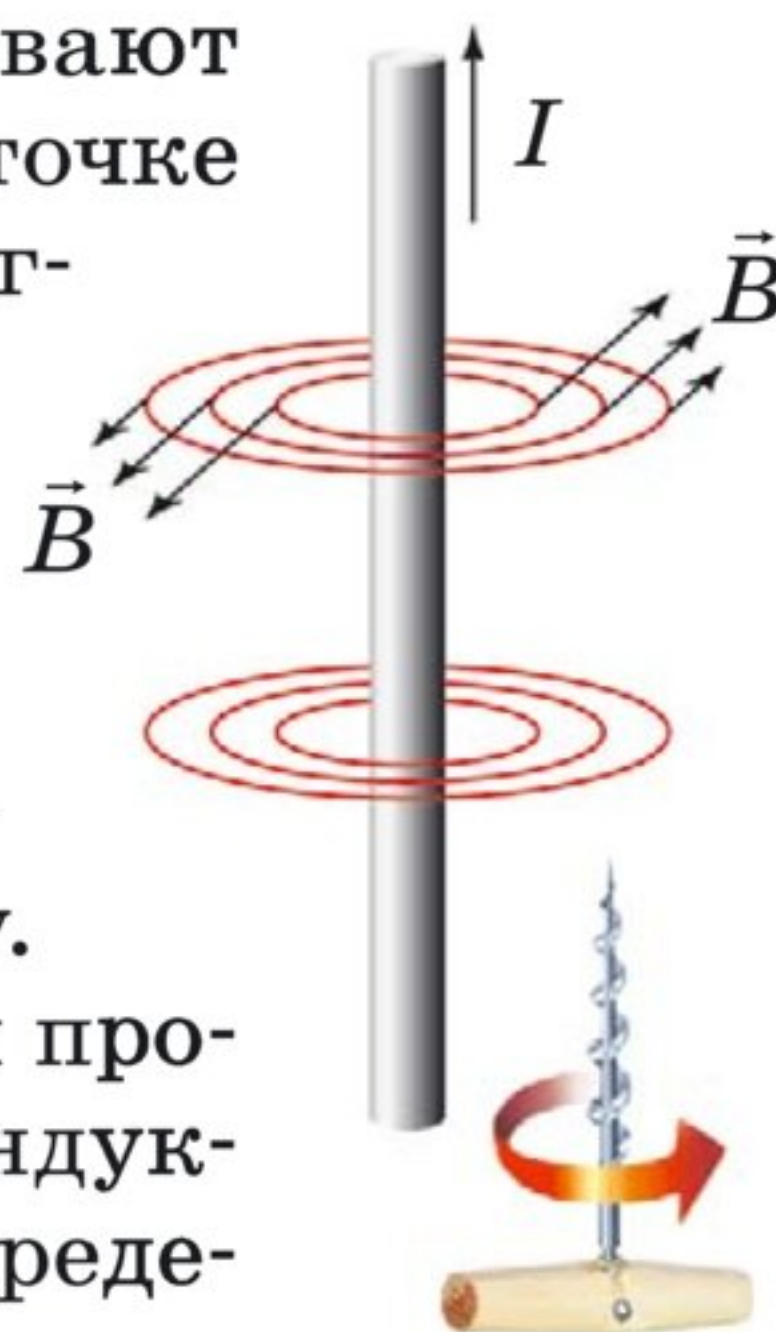
Аналогичный опыт можно провести с рамкой, по которой пропущен ток. Если эту рамку подвесить на гибких и тонких проводниках между полюсами магнита, то рамка повернётся и займёт положение, при котором её плоскость будет перпендикулярна к линии, соединяющей оба полюса магнита. Таким образом, магнитное поле оказывает ориентирующее воздействие и на проводник с током.

Как известно, в физике величины, которые характеризуются не только численным значением, но и направлением, называются векторными. Поэтому физическая величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля, должна быть векторной. Эту величину называют **индукцией магнитного поля** или **магнитной индукцией** и обозначают буквой $\vec{B}$.

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Направление вектора магнитной индукции удобно определить с помощью магнитной стрелки. За направление вектора магнитной индукции принимают направление от южного полюса S к северному полюсу N свободно устанавливающейся магнитной стрелки, помещённой в данную точку поля. Для наглядного изображения распределения магнитного поля в пространстве вводится понятие **линий магнитной индукции**.

Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в каждой точке поля направлены так же, как и вектор магнитной индукции. Картина линий магнитной индукции поля, образованного прямолинейным проводником с током, представляет собой систему концентрических окружностей, лежащих в плоскости, перпендикулярной этому проводнику. Центр этих окружностей находится на оси проводника. При этом направление вектора индукции в конкретной точке пространства определяется правилом правого буравчика.



Модулем магнитной индукции

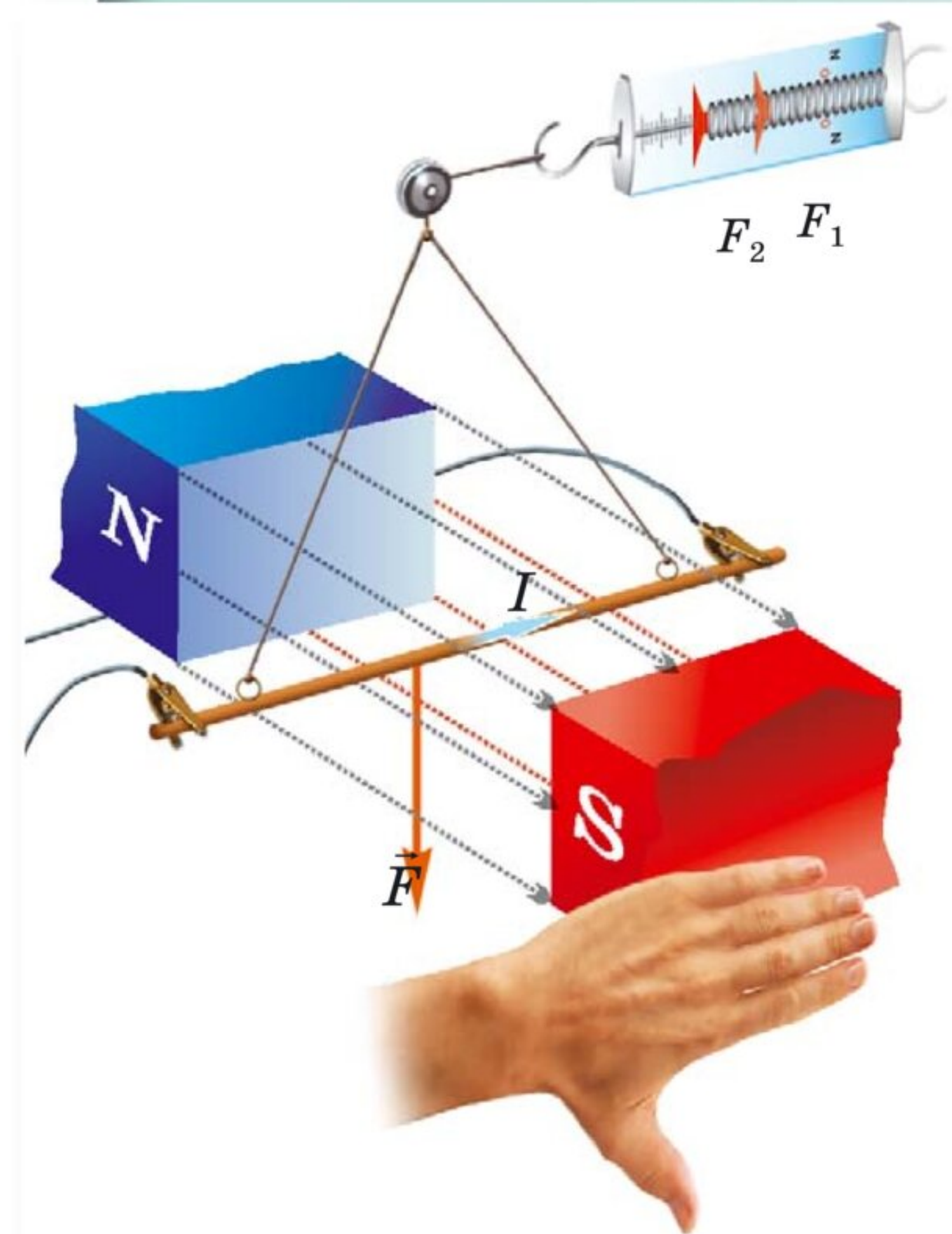
называют величину, равную отношению силы, действующей на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к произведению силы тока в нём на длину проводника:

$$B = \frac{F}{Il}.$$

МОДУЛЬ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Пусть проводник, изготовленный из немагнитного материала, помещён между полюсами подковообразного магнита и уравновешен при помощи динамометра. В этом случае показание F_1 динамометра будет численно равно модулю силы тяжести, действующей на проводник. Если по проводнику пропустить ток в таком направлении, чтобы действующая на него магнитная сила $\vec{F}$ была направлена вертикально вниз, то значение этой силы можно найти по разности показаний динамометра $F = F_2 - F_1$, где F_2 — показание динамометра при наличии тока в проводнике.

Магнитная сила, действующая на проводник, пропорциональна длине l проводника и силе тока I в нём, а также зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Эта сила достигает своего максимального значения в случае, когда проводник расположен перпендикулярно линиям поля. Однако отношение модуля F магнитной силы к длине проводника l и силе тока I не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём. Следовательно, отношение F/Il зависит только от свойств магнитного поля и может служить его количественной характеристикой, которую называют модулем магнитной индукции.



ЕДИНИЦА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила, равная 1 Н. Эту единицу называют **тесла (Тл)**:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Заряженный медный шарик подвешен на нити между полюсами подковообразного магнита. Будет ли на шарик действовать магнитная сила?
- Приведите примеры, показывающие, что магнитное поле оказывает ориентирующее воздействие на магнитную стрелку и рамку с током.
- Как определяется модуль и направление вектора магнитной индукции?

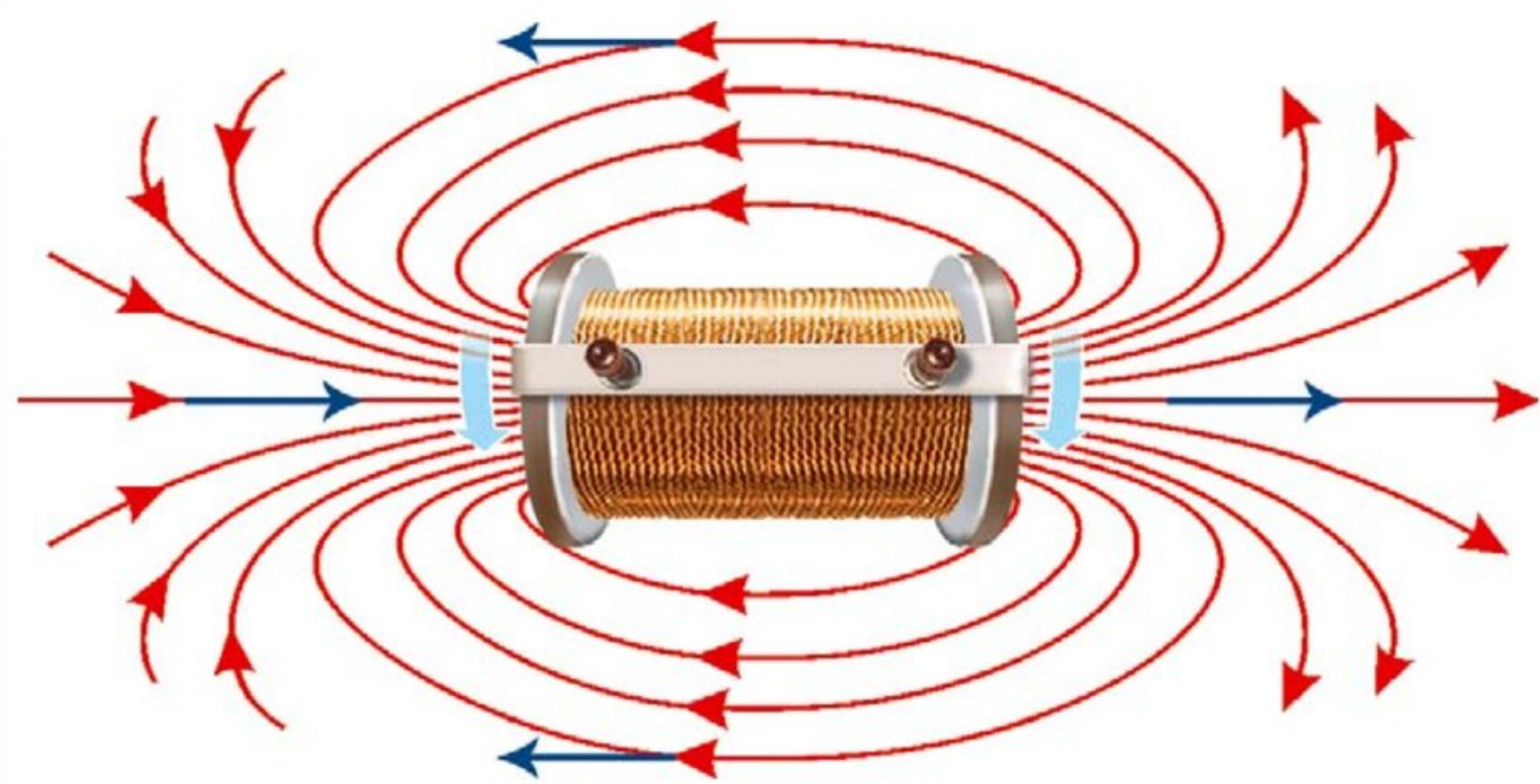
СИЛА АМПЕРА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какое магнитное поле называется однородным.
- Что такое сила Ампера и как она зависит от ориентации проводника с током в магнитном поле.
- Как решать задачи на вычисление силы Ампера.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое магнитная индукция?
- Как направлен вектор магнитной индукции?
- Что такое линии магнитной индукции?
- В чём заключается правило левой руки?



Как показывает опыт, магнитная сила, действующая на проводник с током, зависит не только от силы тока и индукции магнитного поля, но и от расположения проводника в магнитном поле. При изменении ориентации проводника в магнитном поле изменяется не только модуль, но и направление магнитной силы.

ОДНОРОДНОЕ И НЕОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ Магнитную силу, действующую на проводник с током, удобно изучать в случае, когда во всех точках поля вектор магнитной индукции $\vec{B}$ не только одинаково направлен, но и имеет одно и то же значение. Следовательно, и густота линий магнитной индукции в любой области поля будет одной и той же. Такое магнитное поле называют **однородным**. В противном случае магнитное поле называется **неоднородным**.

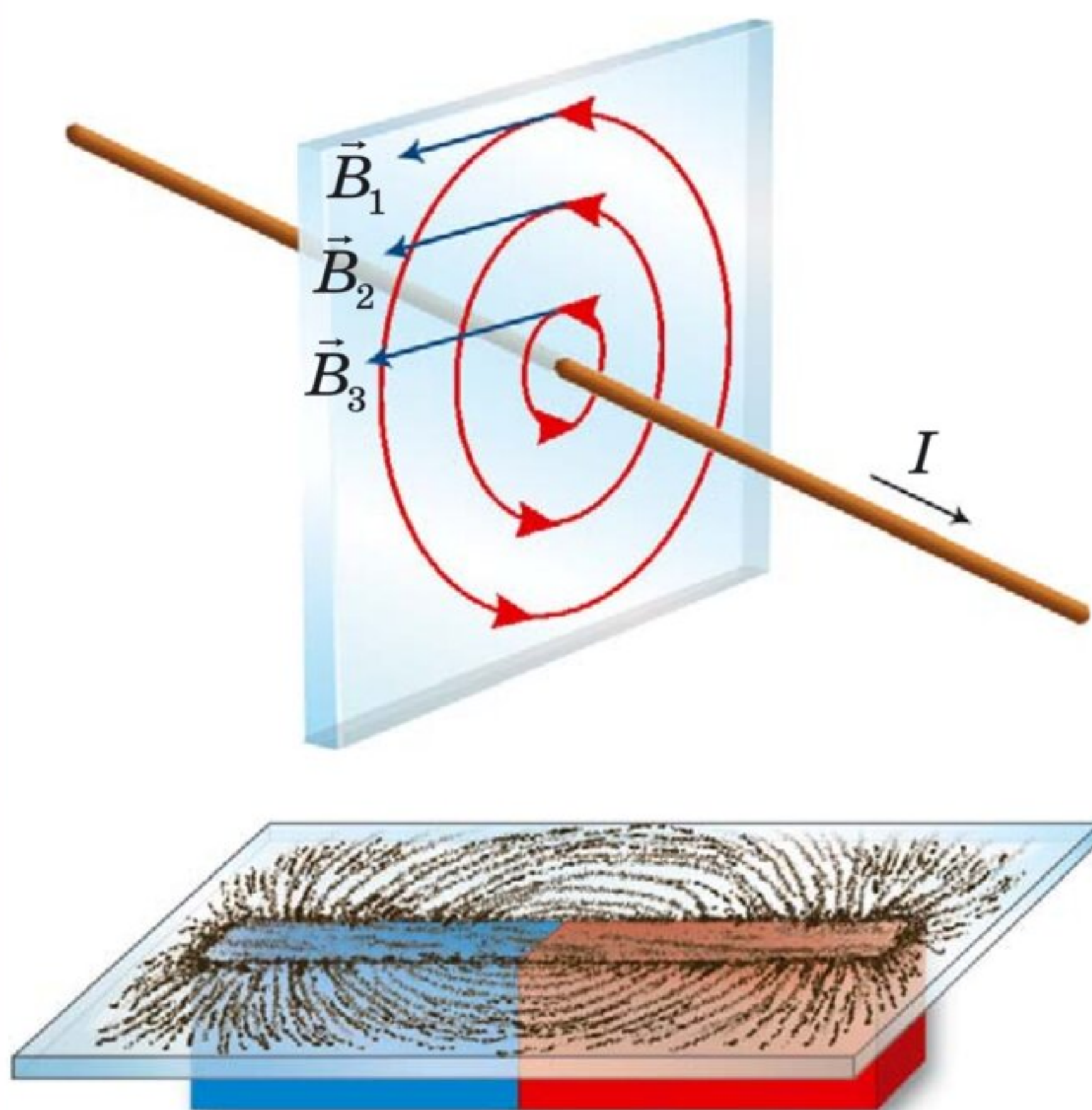
Примером однородного поля может служить магнитное поле внутри катушки с током, у которой длина много больше её диаметра. В этом случае линии магнитной индукции параллельны друг другу и их густота одинакова.

Вне катушки магнитное поле является неоднородным. Близким к однородному является магнитное поле в узком зазоре кольцеобразного магнита.

Характерным примером неоднородного поля является магнитное поле, образованное прямолинейным проводником, по которому пропущен электрический ток.

При этом густота линий магнитной индукции убывает по мере удаления от проводника, что свидетельствует об уменьшении модуля магнитной индукции.

О степени неоднородности магнитного поля можно судить, например, по характеру расположения железных опилок, насыпанных на лист картона, положенный на полосовой магнит.



СИЛА АМПЕРА Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называют **силой Ампера**. Как показывают опыты, сила Ампера зависит от ориентации проводника с током в магнитном поле.

Подвесим на тонких проволочках прямолинейный проводник AC, являющийся частью электрической цепи, между полюсами подковообразного магнита. В данном случае магнитное поле в узком зазоре между полюсами можно считать близким к однородному.

Как показывает опыт, если линии индукции магнитного поля направлены вертикально вниз, а ток в проводнике направлен от точки A к точке C, то проводник

будет втягиваться в промежуток между полюсами магнита. При изменении направления тока в проводнике на противоположное проводник будет выталкиваться из зазора. При этом сила, действующая на проводник, будет максимальной в случае, когда проводник с током перпендикулярен линиям индукции магнитного поля.

Опытным путём Ампер установил, что сила $\vec{F}$, действующая в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ на прямолинейный участок длиной l проводника с током I , перпендикулярна проводнику и линиям магнитной индукции и численно равна

$$F = IBl \sin \alpha,$$

где α — угол между проводником и направлением вектора магнитной индукции. Направление этой силы определяется **правилом левой руки**: если линии магнитной индукции входят в ладонь, а четыре пальца направлены по току, то отогнутый на 90° большой палец указывает направление силы Ампера, действующей на проводник.

Как следует из приведённой выше формулы для силы Ампера, $F = 0$ при $\alpha = 0$, т. е. если проводник с током параллелен линиям магнитной индукции, то магнитное поле на такой ток действовать не будет.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ Проводник длиной 10 см и массой 20 г подвешен на тонких и лёгких проволочках в однородном магнитном поле. При прохождении по проводнику тока силой 2 А он отклоняется так, что проволочки образуют с вертикалью угол 30° . Найдите модуль индукции магнитного поля, если линии индукции перпендикулярны проводнику.

Дано:
 $l = 10 \text{ см}$
 $m = 20 \text{ г}$
 $I = 2 \text{ А}$
 $\alpha = 30^\circ$

СИ
 $0,1 \text{ м}$
 $0,02 \text{ кг}$

Решение:

На проводник, который уравновешен, действуют две силы натяжения проволочек $\vec{T}$, сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и сила Ампера $\vec{F}_A$. Запишем в проекциях на координатные оси OX и OY условия равновесия проводника:

$$OX: 2T \sin \alpha - F_A = 0;$$

$$OY: 2T \cos \alpha - F_{\text{тяж}} = 0.$$

Исключив из последних двух равенств силу натяжения, получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{F_{\text{тяж}}}, \text{ или } mg \operatorname{tg} \alpha = IBl.$$

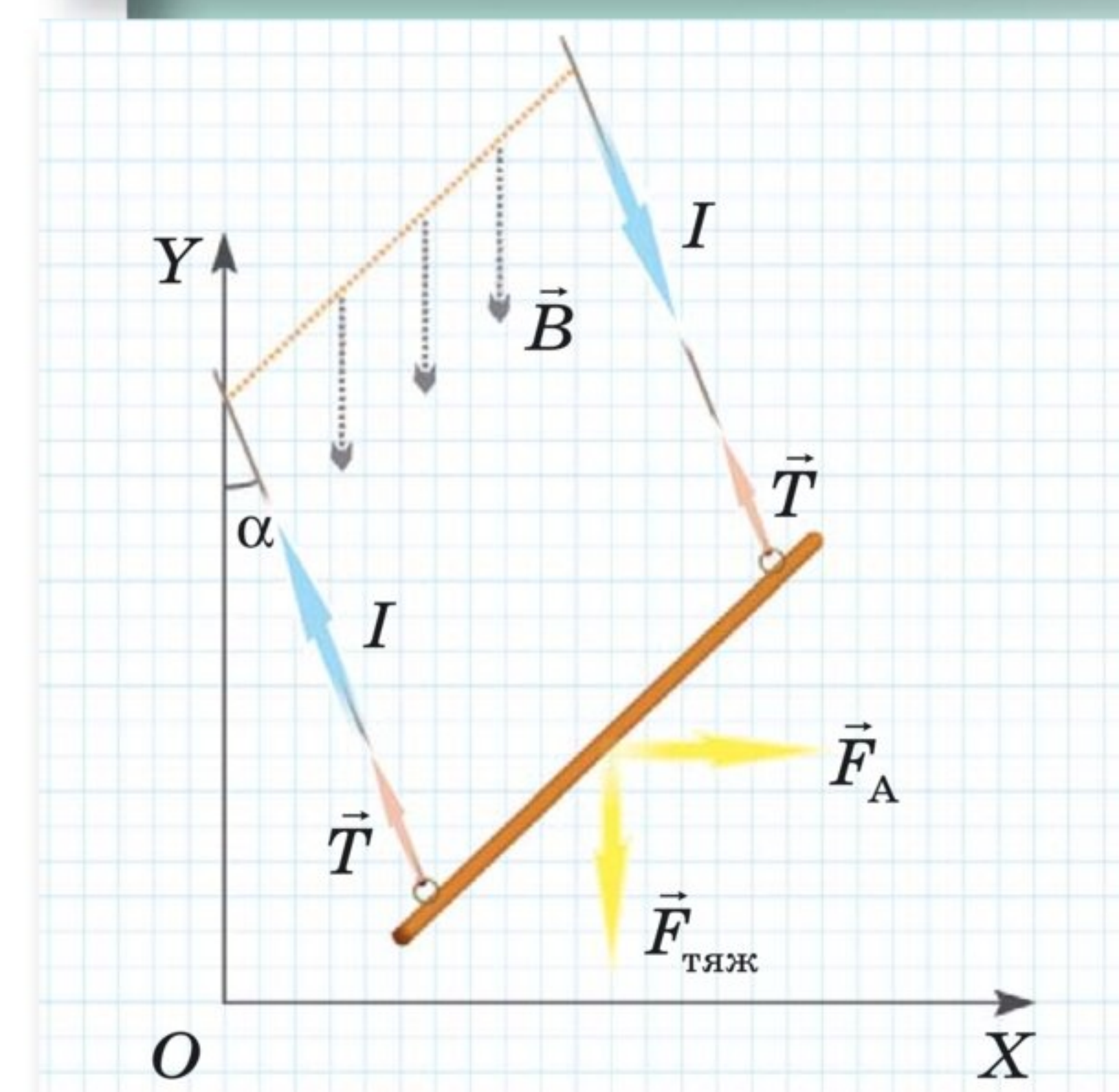
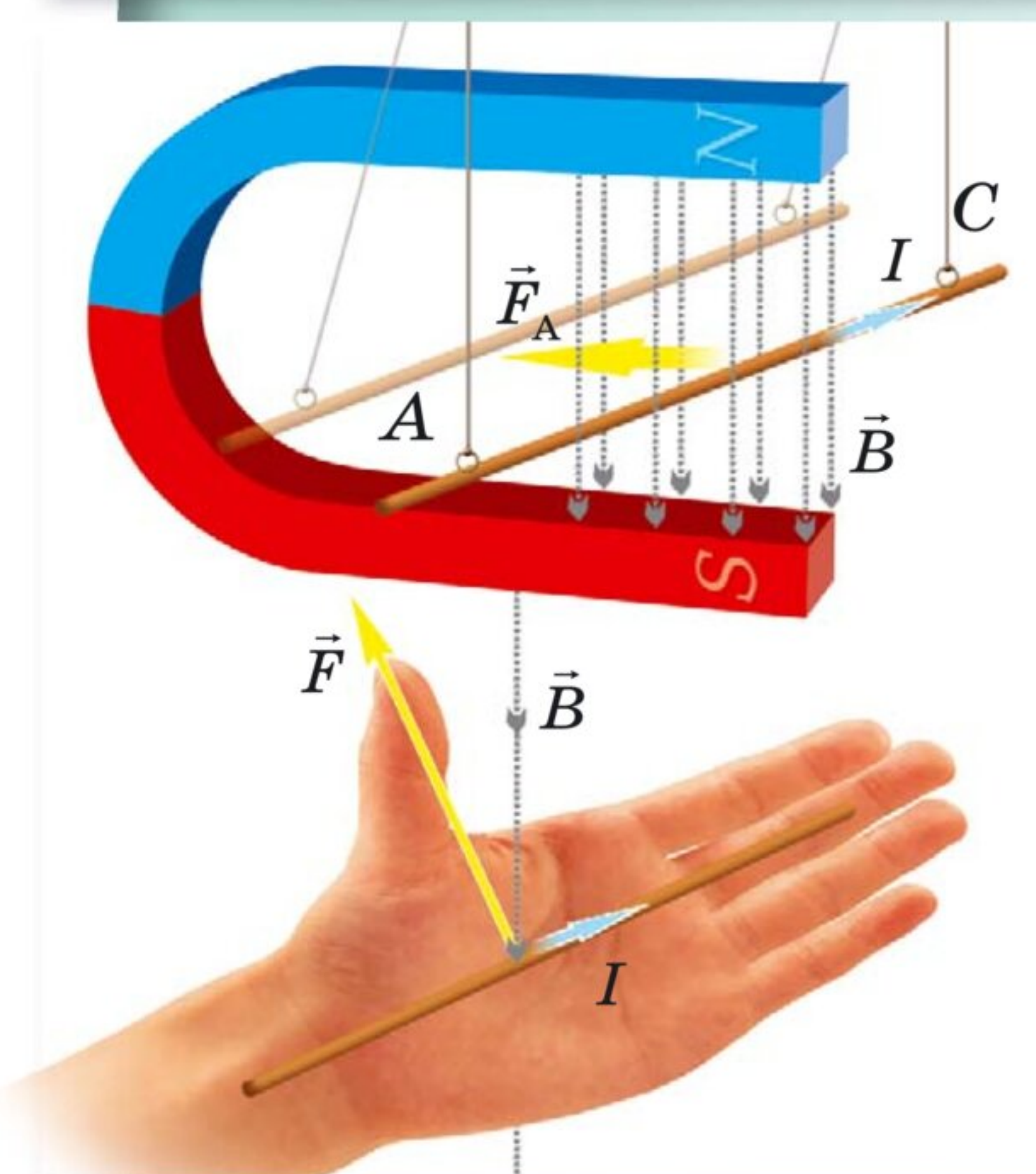
$$\text{Отсюда находим } B = \frac{mg \operatorname{tg} \alpha}{Il}.$$

$$B = \frac{0,02 \cdot 10}{2 \cdot 0,1 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,6 \text{ Тл.}$$

Ответ: $B \approx 0,6 \text{ Тл.}$

Если обозначить величины: сила тока в проводнике — I , индукция однородного магнитного поля — B , длина проводника, находящегося в поле, — l , угол между проводником и направлением вектора магнитной индукции — α , то силу, действующую на проводник, можно рассчитать по формуле

$$F = IBl \sin \alpha.$$



ВОПРОСЫ:

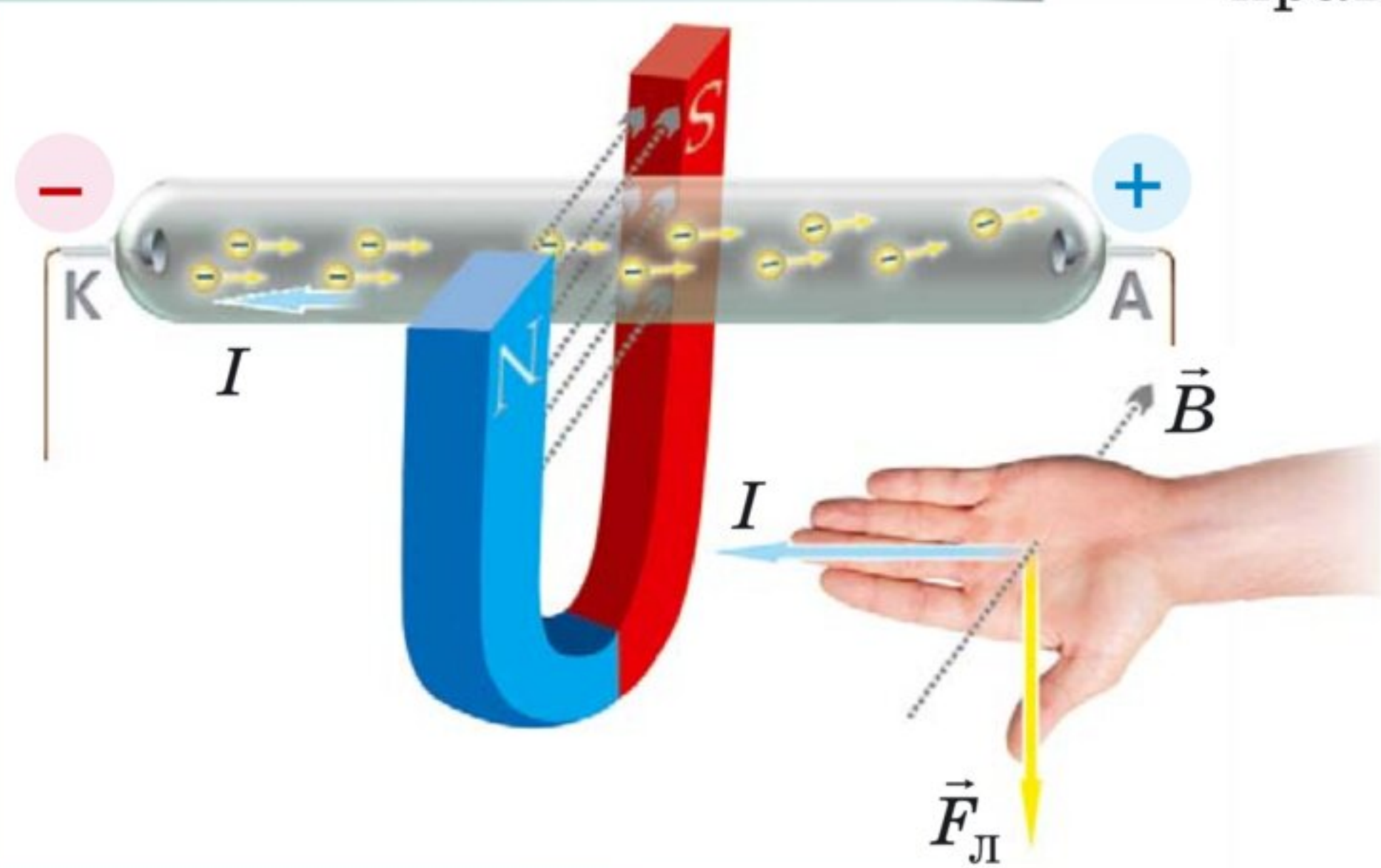
- Чем однородное магнитное поле отличается от неоднородного?
- Как должен быть расположен в магнитном поле проводник, чтобы сила, действующая на него, была максимальной?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу.
- Как определяется модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.
- Может ли магнитная сила совершать работу над движущейся заряженной частицей.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое сила Ампера?
- В чём заключается правило левой руки?
- Как определяется работа силы в механике?



ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ. СИЛА ЛОРЕНЦА

Движущиеся заряды не только создают в окружающем пространстве магнитное поле, но и сами испытывают воздействие со стороны внешних магнитных полей.

ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ

Как известно, электрический ток — это упорядоченное движение заряженных частиц, поэтому действие магнитного поля на проводник с током следует рассматривать как результат действия этого поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника.

Особенно наглядно это видно на примере действия магнитного поля на катодные лучи в электронно-лучевой трубке, которые представляют собой поток быстрых электронов. Поскольку за направление тока принято направление движения положительно заряженных частиц, то направление движения пучка электронов противоположно направлению тока.

Рассмотрим результат действия магнитного поля на электронный пучок в случае, когда электроны в трубке движутся слева направо и линии индукции магнитного поля направлены от нас перпендикулярно пучку. Тогда в соответствии с правилом левой руки пучок электронов должен отклониться вверх, что и наблюдается на опыте. При изменении направления вектора магнитной индукции на противоположное пучок электронов отклоняется вниз.

СИЛА ЛОРЕНЦА Выражение для силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, впервые было получено нидерландским физиком Х. Лоренцом, поэтому эта сила получила название **силы Лоренца**.

Зависимость силы Лоренца от индукции магнитного поля, заряда и скорости частицы, а также характера её движения в магнитном поле можно найти с помощью выражения для силы Ампера.

Действительно, если через поперечное сечение проводника длиной l в течение промежутка времени Δt проходит N частиц, заряд каждой из которых q , то общий заряд, прошедший через это сечение, равен Nq .

Модуль суммарной силы, действующей со стороны магнитного поля на все движущиеся внутри проводника частицы, равен

$$F = IBl \sin \alpha = \frac{Nql}{\Delta t} B \sin \alpha = NqvB \sin \alpha,$$

поскольку модуль средней скорости упорядоченного движения частиц $v = l/\Delta t$. Модуль силы $\vec{F}_L$, действующей на отдельную частицу, будет в N раз меньше:



Хендрик Антон Лоренц
(1853—1928)

Нидерландский физик, исследователь в области электродинамики, лауреат Нобелевской премии по физике.

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha, \quad (1)$$

где α — угол между вектором скорости $\vec{v}$ заряженной частицы и вектором индукции $\vec{B}$ магнитного поля.

Направление силы Лоренца, действующей на **положительно** заряженную частицу, определяется правилом левой руки: если **четыре пальца** **расположены по направлению скорости частицы**, а **линии индукции магнитного поля входят в ладонь**, то **отогнутый большой палец укажет направление силы Лоренца**.

Сила Лоренца существенно отличается от электростатической силы. Кулоновская сила, действующая на заряженную частицу в электрическом поле, всегда направлена по касательной к силовой линии. Сила же Лоренца всегда направлена перпендикулярно как вектору скорости частицы, так и вектору магнитной индукции. Таким образом, поскольку угол между направлениями скорости и силы Лоренца равен 90° , то магнитная сила **работу совершать не может**.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим характер движения заряженных частиц в случае, когда они влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно к его линиям индукции.

Согласно формуле (1) сила Лоренца, действующая на частицу, равна $F_{\text{Л}} = qvB$, так как угол $\alpha = 90^\circ$. Поскольку вектор скорости частицы перпендикулярен вектору индукции в каждой точке поля, то магнитная сила будет искривлять траекторию движения частицы, обеспечивая необходимое центростремительное ускорение:

$$a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{R},$$

где R — радиус окружности, по которой движется частица. Согласно второму закону Ньютона

$$m \frac{v^2}{R} = qvB, \quad (2)$$

где m — масса частицы. Из формулы (2) находим выражение для радиуса кривизны траектории частицы:

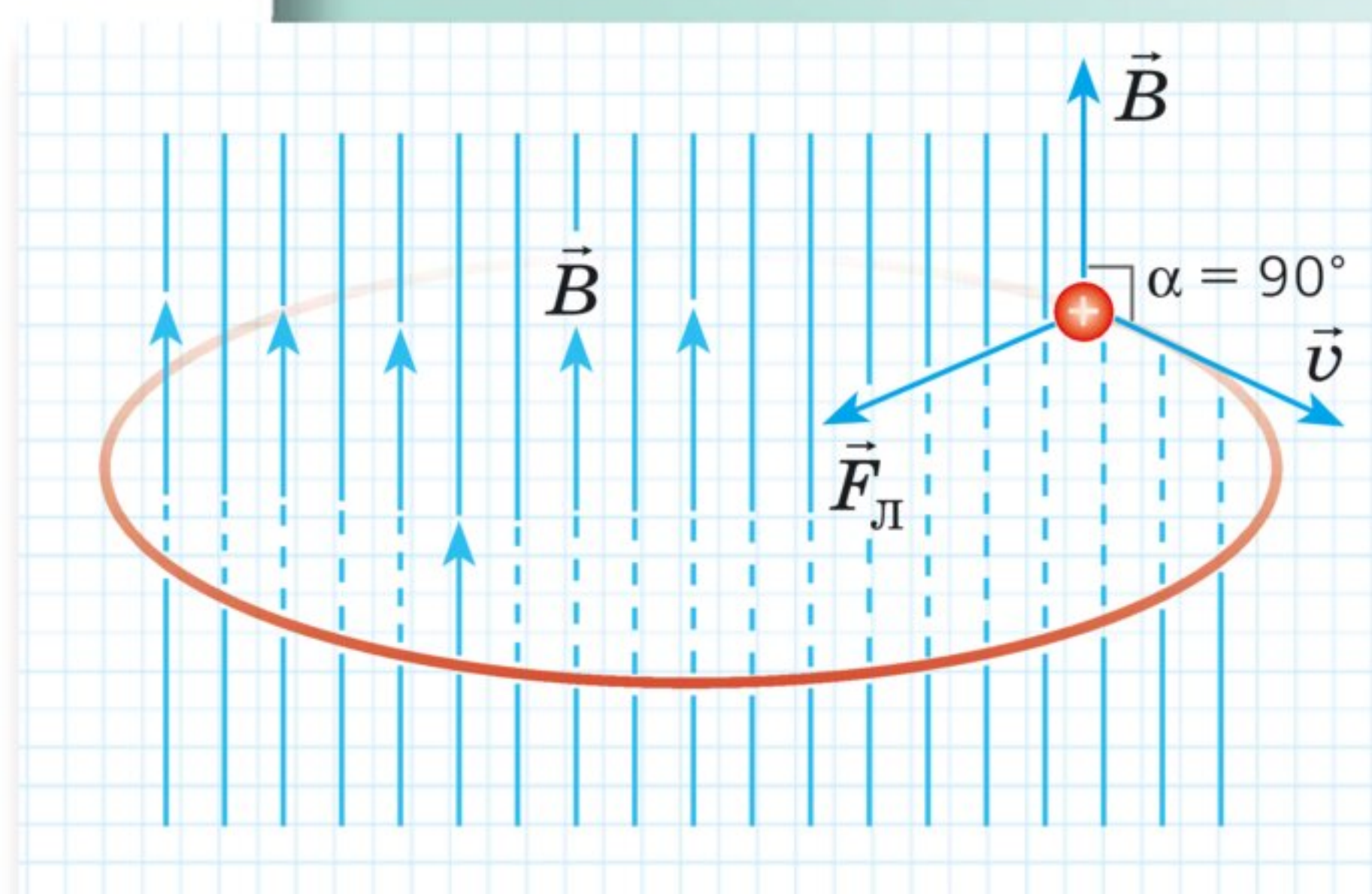
$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), заряженные частицы с неодинаковыми массами, зарядами или скоростями будут двигаться по дугам окружностей с различными радиусами. Это свойство однородного магнитного поля широко используется для разделения движущихся заряженных частиц. Например, измерив радиус кривизны траектории и скорость заряженной частицы, в соответствии с формулой (3) можно найти удельный заряд частицы:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}.$$

Если обозначить величины: заряд частицы — q , скорость движения частицы в магнитном поле — v , индукция магнитного поля — B , угол между направлением вектора скорости и направлением вектора индукции магнитного поля — α , то силу заряженной частицы можно рассчитать по формуле

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$



Более ста лет назад было установлено, что магнитное поле Земли является своеобразным экраном, препятствующим проникновению в атмосферу потока заряженных частиц из космоса. При помощи искусственных спутников были открыты так называемые радиационные пояса Земли — области с большой концентрацией заряженных частиц.

ВОПРОСЫ:

- Заряженная частица движется параллельно линиям магнитной индукции. Будет ли на частицу действовать магнитная сила?
- Может ли магнитное поле изменять кинетическую энергию заряженной частицы?
- От каких физических величин зависит радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электромагнитная индукция.
- Что такое магнитный поток.
- В каких единицах измеряется магнитный поток.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое магнитная индукция?
- Что такое линии магнитной индукции?
- Что собой представляют магнитное поле полосового магнита и катушка с током?
- В чём заключается открытие Эрстеда?



Майкл Фарадей
(1791—1867)

Английский физик-экспериментатор и химик.

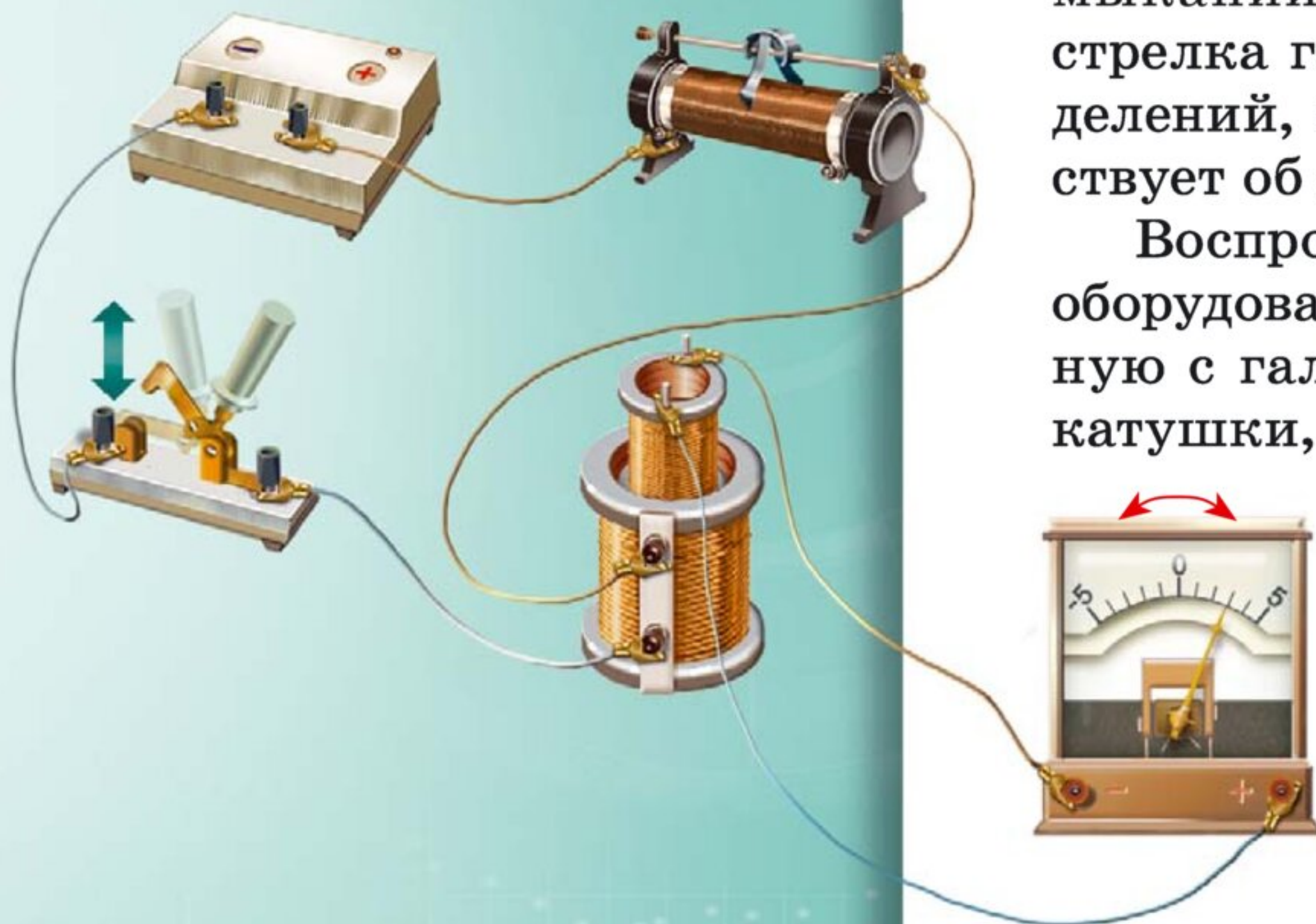
XIX век по праву называют веком электричества. Начало открытиям в области электромагнетизма было положено в 1820 г. Г. Эрстедом, обнаружившим, что при прохождении тока через проводник вокруг него образуется магнитное поле. Спустя 11 лет великий английский физик М. Фарадей совершил открытие, составившее одну из основ современной технической цивилизации.

ОПЫТ ФАРАДЕЯ Тот факт, что решающий шаг в открытии фундаментальных взаимосвязей электрических и магнитных явлений был сделан именно Фарадеем, не был случайным. Фарадей был глубоко убеждён в единой природе электрических и магнитных явлений. Электромагнитные открытия 1820 г. сразу привлекли его внимание, и начиная с 1824 г. Фарадей пытался получить электрический ток в проводе при помощи магнита или тока в другом проводнике. «Превратить магнетизм в электричество» — такой девиз записал Фарадей в своём рабочем дневнике. Открытие явления, которое сам Фарадей назвал электромагнитной индукцией, было сделано им в конце августа 1831 г. Все основные опыты Фарадея не трудно осуществить на базе обычной школьной физической лаборатории.

Повторим один из первых опытов Фарадея, используя электрическую цепь, состоящую из источника тока, гальванометра, реостата, двух катушек и ключа. Цепь соберём таким образом, чтобы катушка, выводы которой соединены с гальванометром, частично входила внутрь другой катушки, подключённой к источнику тока.

Опыт показывает, что в момент замыкания ключа стрелка гальванометра отклоняется на несколько делений, а затем возвращается в исходное положение. Отклонение стрелки свидетельствует о том, что по виткам катушки, соединённой с гальванометром, в течение короткого времени протекал электрический ток. При размыкании ключа наблюдается аналогичное явление: стрелка гальванометра также отклоняется на несколько делений, но в противоположную сторону, что свидетельствует об изменении направления тока в катушке.

Воспроизведём другой опыт Фарадея, используя то же оборудование. При замкнутом ключе катушку, соединённую с гальванометром, будем перемещать относительно катушки, подключённой к источнику. Как свидетельствует опыт, в процессе перемещения катушки в её цепи протекает электрический ток. При этом Фарадей установил, что возникновение тока в катушке не зависит от того, какая из катушек движется: если перемещать катушку, соединённую с источником, то результат



будет тот же самый — в цепи катушки, соединённой с гальванометром, появится ток.

Как объяснить описанное выше явление? Может быть, определяющую роль в возникновении тока в катушке, соединённой с гальванометром, играет источник? Однако Фарадей опытным путём показал, что это не так. Он исключил источник тока и собрал цепь, состоящую только из катушки и гальванометра. Когда Фарадей вводил внутрь катушки обычный полосовой магнит, стрелка гальванометра отклонялась, что свидетельствовало о возникновении тока в цепи катушки.

Хотя рассмотренные выше опыты внешне выглядят различно, Фарадей отчётливо понял, что индукционный ток в замкнутом контуре возникает только тогда, когда изменяется число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Число линий магнитной индукции, проходящих через некоторую поверхность, удобно характеризовать с помощью физической величины, называемой **магнитным потоком**.

ПОТОК МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ Понятие магнитного потока проще всего ввести на примере однородного магнитного поля, в каждой точке которого индукция одинакова, а линии индукции параллельны друг другу. Поток магнитной индукции, который обозначается буквой Φ , можно рассматривать как величину, пропорциональную числу магнитных линий через площадь S , ограничивающую некоторую поверхность. Поскольку число магнитных линий зависит от их густоты, то магнитный поток пропорционален модулю вектора магнитной индукции: $\Phi \sim B$. Магнитный поток также пропорционален площади контура S : $\Phi \sim S$ и зависит от проекции вектора индукции $\vec{B}$ на направление вектора единичной нормали $\vec{n}$ к площади S :

$$\Phi \sim B \cos \alpha,$$

где α — угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$ ($|\vec{n}| = 1$).

Таким образом,

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Очевидно, что в случаях, когда линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости контура, магнитный поток принимает наибольшее значение.

В СИ за единицу магнитного тока принят *вебер* (Вб). 1 Вб — это магнитный поток через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную в однородном магнитном поле индукцией 1 Тл, перпендикулярно линиям индукции:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

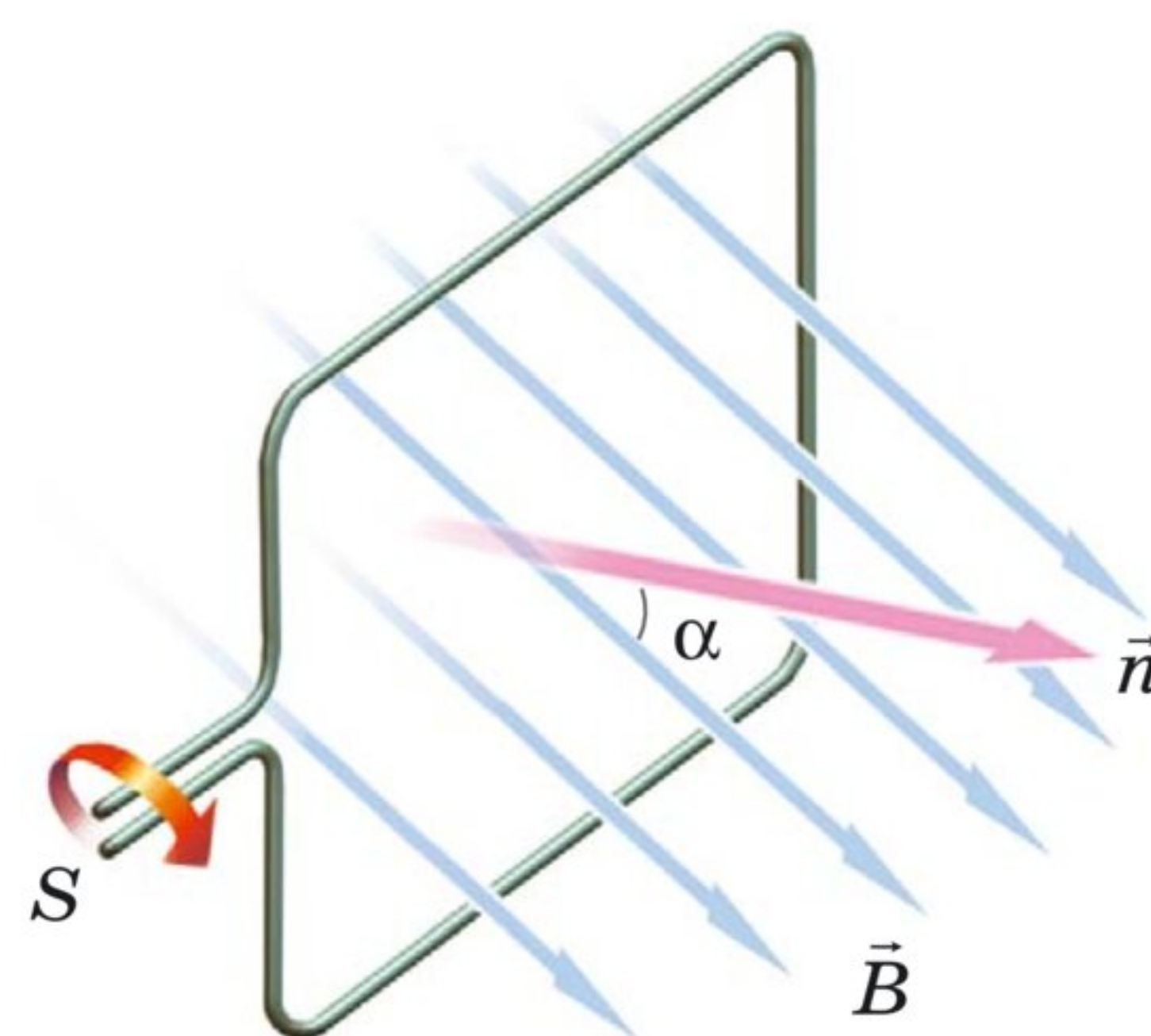
На практике обычно используется и меньшая единица магнитного потока — милливебер:

$$1 \text{ мВб} = 0,001 \text{ Вб}.$$



Если обозначить величины: модуль индукции однородного магнитного поля — B , площадь контура, ограничивающего некоторую поверхность, — S , угол, который образуют линии магнитной индукции с вектором единичной нормали к площади S , — α , то магнитный поток через плоскую поверхность площадью S равен

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$



ВОПРОСЫ:

- В чём заключается явление электромагнитной индукции?
- Что являлось общим во внешне различных опытах Фарадея?
- Что такое поток магнитной индукции и от каких физических величин он зависит?
- Может ли магнитный поток принимать отрицательные значения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключается правило Ленца.
- Как формулируется закон электромагнитной индукции.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое магнитный поток?
- В каких единицах измеряется магнитный поток?
- Что такое электродвижущая сила и в каких единицах она измеряется?



**Эмилий Христианович
Ленц**

(1804—1865)

Российский физик, один из основоположников электротехники.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

На предыдущем уроке вы познакомились с явлением электромагнитной индукции на качественном уровне. Однако для решения практических задач необходимо знать количественные закономерности наблюдаемого явления.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА

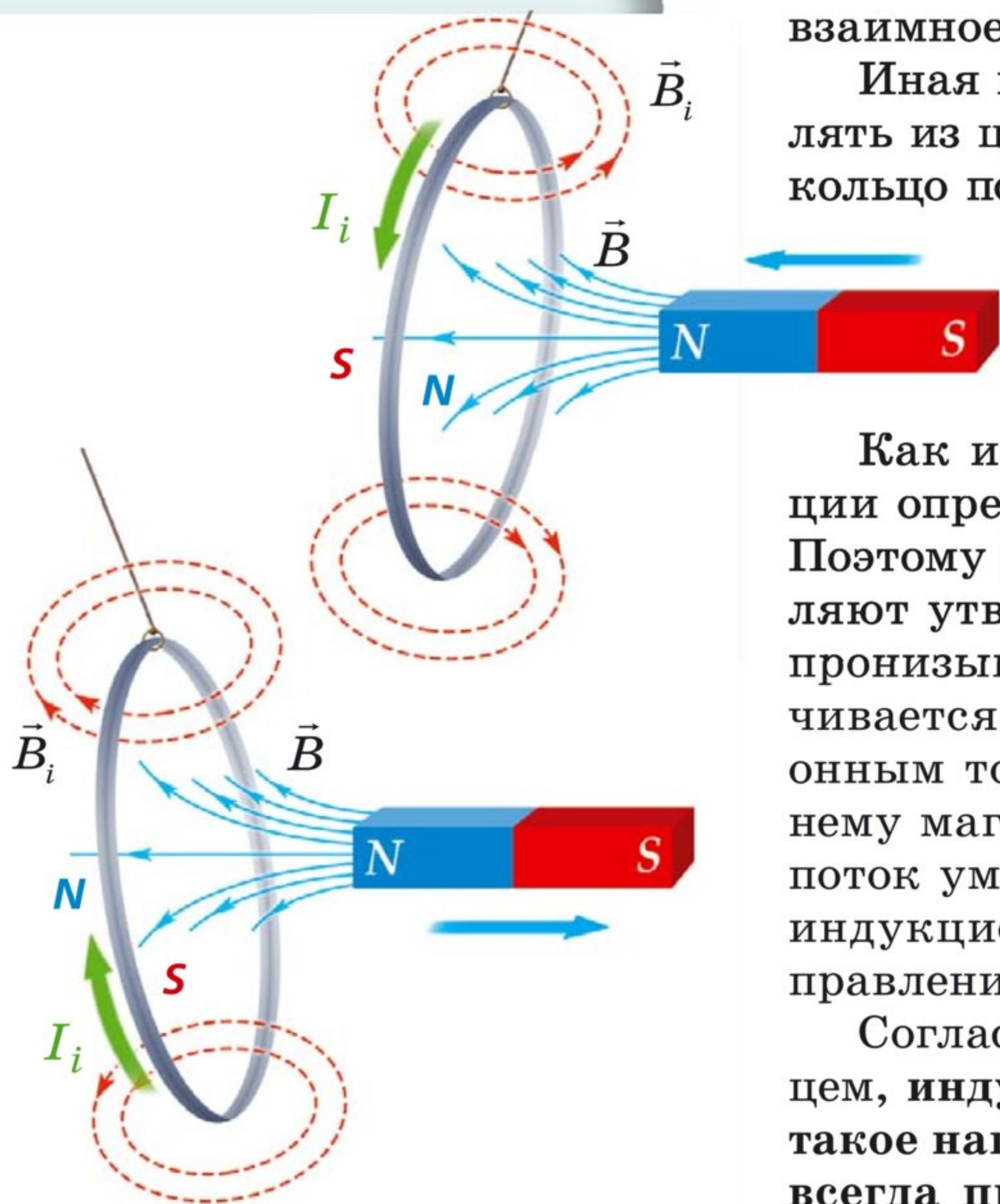
На одну важную качественную сторону явления электромагнитной индукции обратил внимание российский физик Э. Х. Ленц, которого интересовал вопрос о направлении индукционного тока в замкнутом проводящем контуре.

Проведем опыт, позволяющий установить взаимосвязь между направлением индукционного тока и характером изменения потока через контур, охватываемый проводником. Для этого подвесим на длинной тонкой нити лёгкое алюминиевое кольцо и будем приближать к нему полосовой магнит, пытаясь пронести его через центр кольца. Опыт показывает, что кольцо будет отталкиваться от магнита. Это означает, что индукционный ток в кольце имеет такое направление, что порождённое им магнитное поле направлено противоположно полю магнита. Например, если приближать магнит к плоскости кольца северным полюсом, то с этой стороны кольца будет образован тоже северный полюс, а с противоположной — южный. Именно по этой причине и происходит взаимное отталкивание кольца и магнита.

Иная картина наблюдается в случае, если магнит удалять из центра кольца. Как показывает опыт, на этот раз кольцо последует за магнитом, притягиваясь к нему. Это говорит о том, что направление индукционного тока в кольце изменилось на противоположное и на ближайшей к магниту стороне кольца образовался южный магнитный полюс.

Как известно, направление линий магнитной индукции определяет направление и знак магнитного потока. Поэтому результаты рассмотренных выше опытов позволяют утверждать, что если внешний магнитный поток, пронизывающий контур замкнутого проводника увеличивается, то магнитный поток, порождённый индукционным током, должен быть направлен навстречу внешнему магнитному потоку. Если же внешний магнитный поток уменьшается, то магнитный поток, порождённый индукционным током, будет совпадать по знаку и направлению с внешним магнитным потоком.

Согласно общему правилу, сформулированному Ленцем, **индукционный ток в замкнутом проводнике имеет такое направление, что созданный им магнитный поток всегда препятствует изменению внешнего магнитного потока, которое и порождает этот ток.**



ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ Опыты, осуществлённые М. Фарадеем, показали, что индукционный ток I_i в проводящем контуре пропорционален скорости изменения внешнего магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. Если за малое время Δt изменение магнитного потока равно $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока определяется отношением $\Delta\Phi/\Delta t$. Следовательно, согласно опыту

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Кроме того, сила тока в контуре зависит от свойств самого контура, а именно от его сопротивления. При одной и той же скорости изменения магнитного потока сила тока в разных проводниках, очевидно, будет различна. По этой причине закон электромагнитной индукции должен быть сформулирован таким образом, чтобы в нём не фигурировали свойства самого проводника.

Как известно, электрический ток любой природы, включая ток индукционный, течёт в цепи только при наличии в ней электродвижущей силы. Это означает, что при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную проводником, в нём возникает ЭДС, которую называют **ЭДС индукции** и обозначают буквой $\mathcal{E}_i$.

Таким образом, закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС: **ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:**

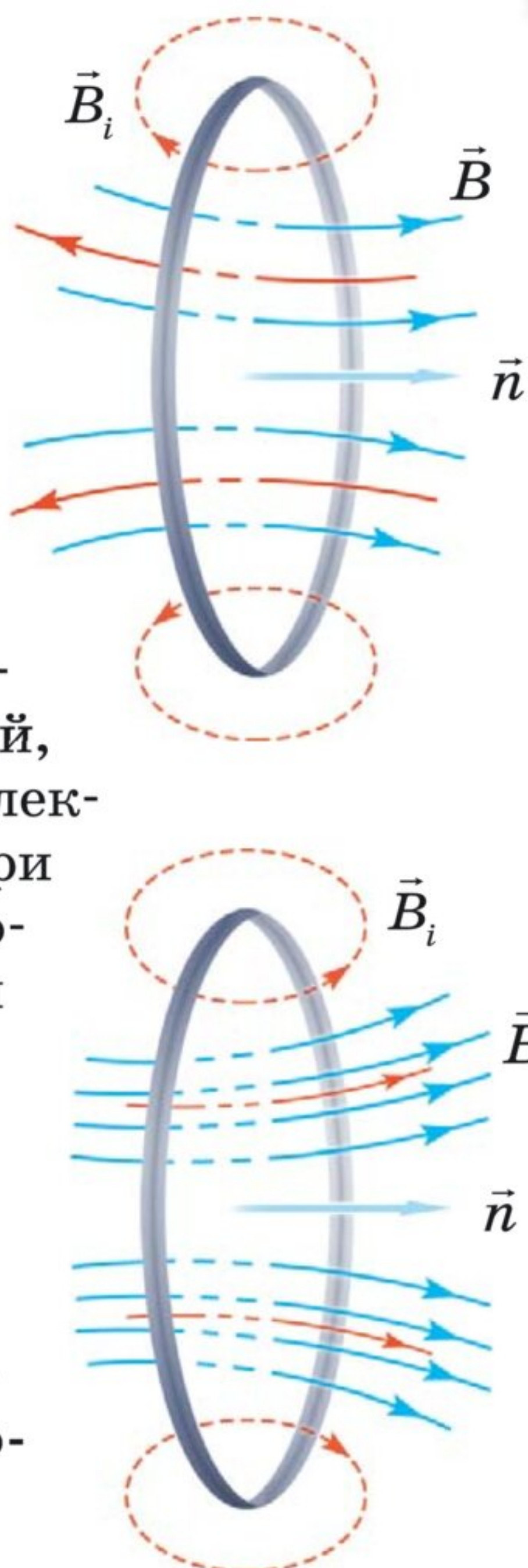
$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Вместе с тем в законе электромагнитной индукции должно быть отражено также и правило Ленца. Действительно, если внешний магнитный поток, пронизывающий поверхность, ограниченную проводящим контуром, возрастает, т. е. $\Delta\Phi/\Delta t > 0$, то магнитный поток Φ_i , порождённый индукционным током, будет направлен навстречу внешнему магнитному потоку. Это означает, что знак ЭДС индукции в этом случае является отрицательным.

Если же внешний магнитный поток уменьшается, т. е. $\Delta\Phi/\Delta t < 0$, то знак ЭДС индукции будет положительным. В этом случае направление обоих магнитных потоков оказывается одинаковым.

Таким образом, с учётом знака ЭДС закон электромагнитной индукции записывается в виде

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$



Если обозначить величины: скорость изменения магнитного потока $\Delta\Phi$ за время Δt через поверхность, ограниченную контуром, — $\Delta\Phi/\Delta t$, то ЭДС индукции в этом контуре можно вычислить по формуле

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

$$\begin{aligned} \Phi > 0, \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0 \\ \Phi_i < 0, \quad \mathcal{E}_i < 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi > 0, \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0 \\ \Phi_i > 0, \quad \mathcal{E}_i > 0 \end{aligned}$$

ВОПРОСЫ:

- Как формулируется правило Ленца?
- Почему закон электромагнитной индукции формулируется для ЭДС, а не для силы тока?
- Как обосновывается наличие знака «минус» в законе электромагнитной индукции?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое индукционное электрическое поле.
- Чем отличается индукционное электрическое поле от кулоновского.
- Что такое токи Фуко.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон электромагнитной индукции?
- В чём заключается правило Ленца?
- Как применяется правило буравчика на практике?
- Что такое электродвижущая сила?



Джеймс Клерк Максвелл
(1831—1879)

Английский физик, создатель классической электродинамики, один из основателей статистической физики.

ИНДУКЦИОННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

На предыдущих уроках вы изучали явление электромагнитной индукции как на качественном уровне, так и с использованием количественных закономерностей. При этом возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре объясняется действием на заряды ЭДС индукции, возникающей в проводнике в результате изменения магнитного потока. Однако остаётся непонятным, почему свободные электроны, находящиеся в покое проводнике, приходят в направленное движение.

ИНДУКЦИОННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ Вопрос действительно является принципиальным, так как неясно, какие силы заставляют электроны двигаться направленно. Магнитное поле не может быть причиной направленного движения электронов, поскольку оно действует только на движущиеся заряженные частицы. При этом учёт хаотического теплового движения электронов в неподвижном проводнике не меняет сути дела. Дело в том, что средняя скорость такого движения равна нулю, и поэтому воздействие магнитного поля на беспорядочно движущиеся заряды не влияет на их упорядоченное движение.

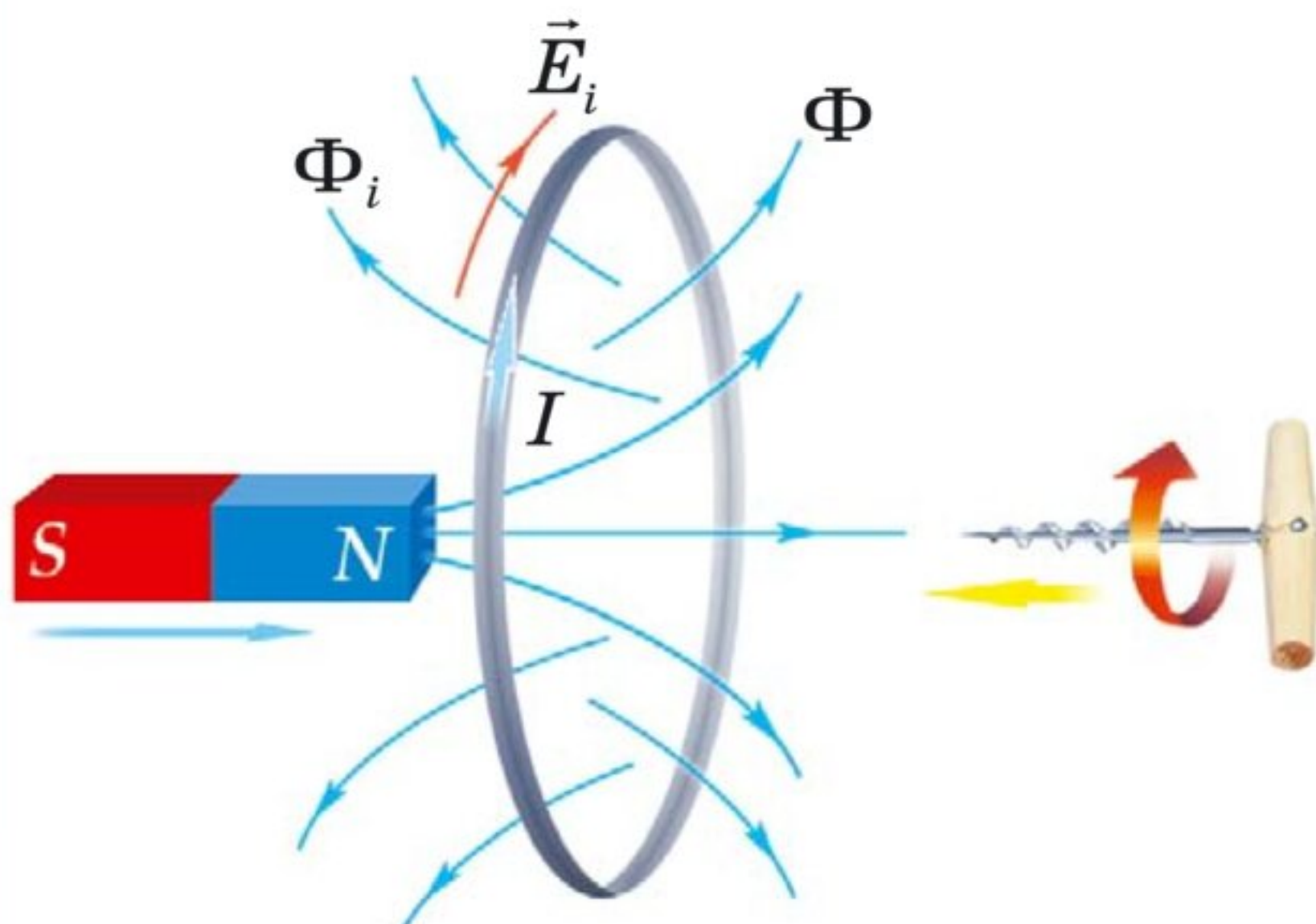
Вместе с тем хорошо известно, что на заряды, как покоящиеся, так и движущиеся, действует электрическое поле. Однако это поле, называемое электростатическим, создаётся неподвижными зарядами, тогда как индукционный ток возникает под действием изменяющегося магнитного поля.

Ответ на поставленный вопрос впервые получил в 1865 г. английский физик Дж. Максвелл, который теоретически обосновал новое фундаментальное свойство магнитного поля: **изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле.**

Это поле по своей природе является индукционным и никак не связано с электрическими зарядами. Силовые линии такого поля нигде не начинаются и не кончаются и представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Такие поля называют **вихревыми**.

На основе концепции существования вихревого электрического поля можно более предметно обсудить причину возникновения тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Действительно, если приближать магнит к замкнутому проводнику, то согласно правилу Ленца знак и направление магнитного потока Φ_i , порождённого индукционным током, будут противоположны знаку и направлению внешнего магнитного потока Φ . При этом направление индукционного тока в контуре определяет-



ся правилом буравчика: если буравчик поступательно перемещать в направлении магнитного потока, порождённого индукционным током, то направление вращения рукоятки буравчика покажет направление тока в контуре.

Если же магнит удалять от проводящего контура, то внешний магнитный поток будет убывать. Согласно правилу Ленца направление магнитного потока, порождённого индукционным током, в этом случае уже будет совпадать с направлением внешнего магнитного потока. Это возможно только в результате изменения направления индукционного тока в контуре на противоположное. Правило буравчика также подтверждает этот вывод.

Таким образом, направление силовых линий вихревого электрического поля определяется знаком изменения внешнего магнитного потока $\Delta\Phi$. При этом направление силовых линий напряжённости $\vec{E}_i$ этого поля совпадает с направлением индукционного тока, что полностью согласуется с характером движения зарядов в кулоновском поле.

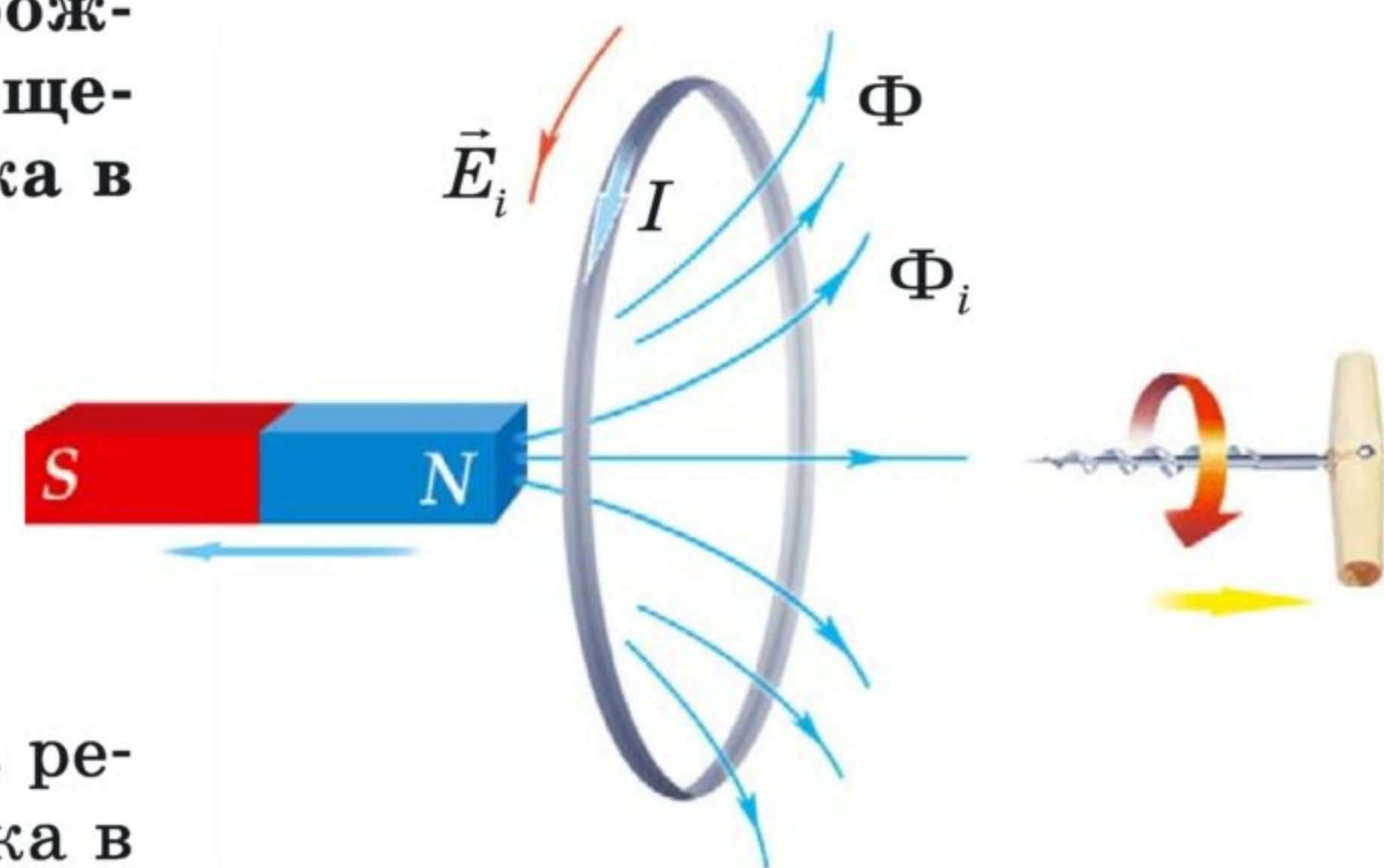
Вместе с тем вихревое поле по своим свойствам отличается от электростатического. Например, работа сил вихревого поля при перемещении заряда по замкнутой траектории **не равна нулю**.

Последнее означает, что работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого проводника **численно равна ЭДС индукции** в этом проводнике.

ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК В СПЛОШНЫХ ПРОВОДНИКАХ Если изменяющийся магнитный поток пронизывает проводящее тело, то в нём возникает вихревое электрическое поле и будет циркулировать индукционный ток.

Поскольку сопротивление сплошных проводников обычно мало, то вихревые токи, называемые **токами Фуко**, могут достигать больших значений. В результате протекания токов Фуко проводники нагреваются, что используется на практике. В частности, на этом принципе основано устройство индукционных электропечей, используемых для плавки и получения особо чистых металлов.

Вместе с тем в ряде технических устройств возникновение токов Фуко приводит к избыточному тепловыделению, что нарушает их нормальную работу. По этой причине железные сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготавливают из отдельных пластин, изолированных друг от друга прослойками лака. Это приводит к существенному увеличению сопротивления сердечников и подавлению токов Фуко.



ВОПРОСЫ:

- Какова природа возникновения и существования индукционного электрического поля?
- Что собой представляют силовые линии индукционного электрического поля?
- Как токи Фуко используются на практике? Всегда ли они полезны?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключается явление самоиндукции.
- Что такое индуктивность проводника.
- В каких единицах измеряют индуктивность.
- Как записывают выражение для ЭДС самоиндукции.
- Что такое энергия магнитного поля.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое поток магнитной индукции?
- Как формулируется закон электромагнитной индукции?
- Что такое вихревое электрическое поле?

САМОИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В рассмотренных выше опытах возникновение ЭДС индукции в замкнутом контуре было связано с изменением внешнего магнитного потока, пронизывающего этот контур. Однако изменение магнитного потока возможно также и в результате изменения силы тока в самом проводнике. При этом силы вихревого электрического поля, возникающего в контуре, будут совершать работу по перемещению зарядов. Работа, как известно, всегда связана с изменением энергии, в данном случае энергии магнитного поля, создаваемого током.

САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

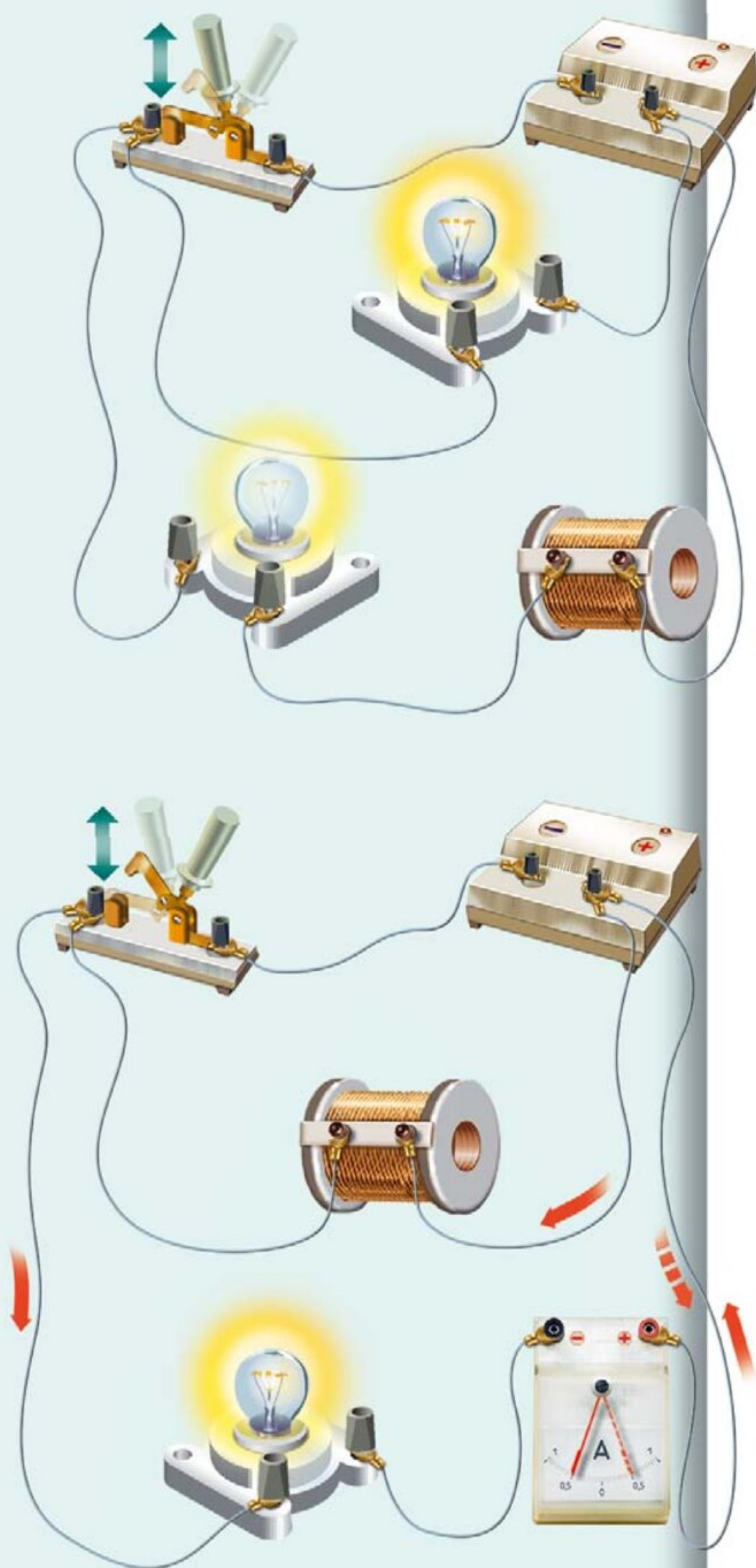
Если протекающий по виткам катушки ток изменяется, то будет также изменяться и поток магнитной индукции, пронизывающий катушку. В результате возникает ЭДС индукции в том же самом проводнике, по которому протекает изменяющийся ток. Это явление называют **самоиндукцией**.

Явление самоиндукции можно наблюдать с помощью обычного школьного оборудования. Действительно, соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока и двух одинаковых лампочек, соединённых параллельно. При этом первая лампочка подключена непосредственно к источнику, а вторая — последовательно с катушкой, содержащей большое число витков.

Как показывает опыт, первая лампочка вспыхивает практически сразу же в момент замыкания ключа, а вторая — с некоторой временной задержкой. Это говорит о том, что сила тока в этой части цепи не сразу достигает своего максимального значения.

Объяснить наблюдаемое явление можно на основе уже известных законов электромагнетизма. После замыкания ключа в цепи появляется электрический ток, который начинает возрастать. Это приводит к возрастанию магнитного потока, пронизывающего контур, образуемый витками катушки. По правилу Ленца силы вихревого электрического поля будут препятствовать нарастанию магнитного потока и, следовательно, росту тока.

Возникновение ЭДС самоиндукции можно также наблюдать и при размыкании цепи. В этом случае в цепь последовательно с лампочкой включим амперметр. При замыкании ключа в катушке на короткое время возникает ЭДС самоиндукции, которая будет препятствовать нарастанию тока, протекающего по её виткам. Однако сразу после размыкания ключа направление тока, протекающего через амперметр, изменится на противоположное (первоначальное направление тока через амперметр обозначено на рисунке пунктирной стрелкой). При этом сила тока при размыкании цепи может даже превышать его значение при замкнутом ключе. Согласно закону электромагнитной индукции возникновение ЭДС



самоиндукции обусловлено изменением магнитного потока. Так как магнитный поток Φ пропорционален индукции магнитного поля, а индукция пропорциональна силе тока в проводнике $B \sim I$, то зависимость магнитного потока от силы тока в контуре можно записать в виде

$$\Phi = LI, \quad (1)$$

где физическая величина L — индуктивность контура. Если форма контура остаётся неизменной, а магнитный поток меняется только за счёт изменения силы тока, то в соответствии с законом электромагнитной индукции выражение для ЭДС самоиндукции примет вид

$$\mathcal{E}_{iL} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет ввести единицу индуктивности, которая в системе единиц СИ называется *генри*. Согласно формуле (2) индуктивность проводника равна 1 генри, если при равномерном изменении силы тока на 1 А за 1 с в нём возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot 1 \frac{\text{с}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Индуктивность проводника зависит от его размеров и формы, но не зависит от силы тока в нём.

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ Как уже отмечалось выше, при замыкании цепи росту тока препятствуют силы вихревого электрического поля. Это означает, что в данном случае ЭДС самоиндукции направлена против ЭДС источника тока. При этом источник совершает работу, которая идёт на увеличение энергии тока и частично на выделение тепла. Таким образом, энергия магнитного поля определяется той работой, которую совершает источник для создания тока. При размыкании цепи и исчезновении тока знак работы сил вихревого электрического поля становится положительным и запасённая энергия тока выделяется. Если индуктивность цепи достаточно велика, то выделение энергии при размыкании ключа может сопровождаться искрой.

Учитывая, что вывод формулы для энергии магнитного поля выходит за рамки данного курса физики, приведём конечный результат:

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (3)$$

Как известно, сила тока пропорциональна скорости движения зарядов $I \sim v$. Поэтому формула (3) по форме записи напоминает выражение для кинетической энергии тела:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда следует, что механическим аналогом индуктивности является масса.

Если обозначить величины: индуктивность контура — L , изменение силы тока за время Δt — ΔI , то ЭДС самоиндукции можно рассчитать по формуле

$$\mathcal{E}_{iL} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Если обозначить величины: индуктивность контура — L , сила тока в контуре — I , то энергию магнитного поля, порождённого данным током, можно рассчитать по формуле

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Искра при открытии цепи будет сильнее, когда длинную соединительную проволоку наматывают на цилиндр в виде спирали, а ещё сильнее, когда цилиндр будет железный...

Эмилий Ленц

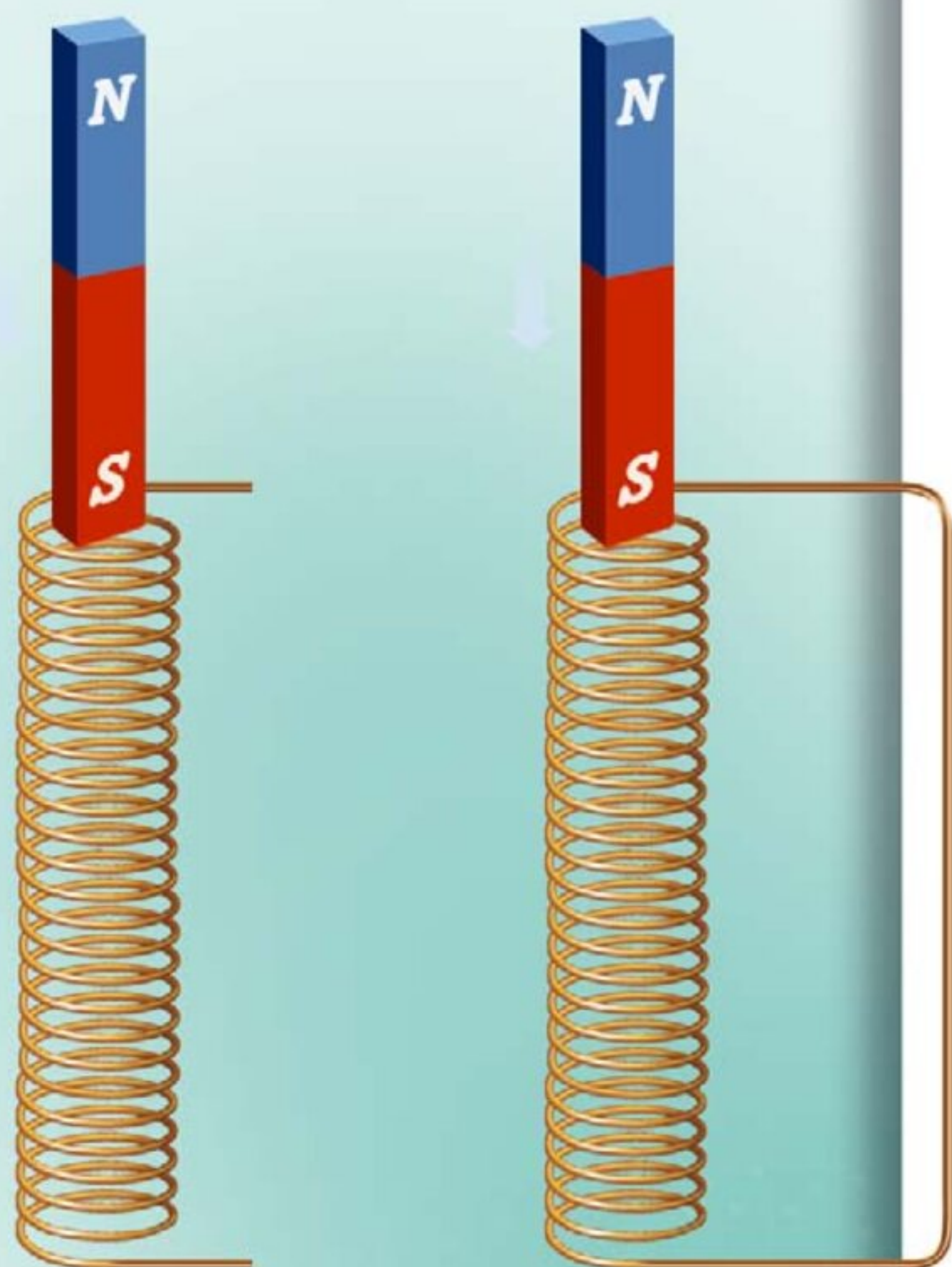
ВОПРОСЫ:

- Имеется ли принципиальное различие между явлениями индукции и самоиндукции?
- Как изменение силы тока в контуре влияет на ЭДС самоиндукции?
- Что называют энергией тока и от каких физических величин эта энергия зависит?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление скорости частиц при движении под действием силы Лоренца.
- Как решать задачи на закон электромагнитной индукции.
- Как решать задачи на вычисление энергии магнитного поля.



ЗАДАЧА 1 Два одинаковых полосовых магнита падают в вертикальном положении одновременно с одной и той же высоты. Первый во время падения проходит сквозь незамкнутый соленоид, а второй — сквозь короткозамкнутый соленоид. Сравните время падения магнитов.

Решение:

При падении магнитов будет изменяться магнитный поток, пронизывающий витки соленоидов, в результате чего в витках будет наводиться ЭДС индукции. В случае замкнутого соленоида по его виткам должен протекать электрический ток такого направления, чтобы магнитное поле, порождённое этим током, в соответствии с правилом Ленца препятствовало изменению внешнего магнитного потока. Это приведёт к замедлению падения магнита, поскольку на него будет действовать тормозящая сила со стороны магнитного поля, порождённого индукционным током.

Такой же вывод можно получить на основе закона сохранения энергии. В случае замкнутого соленоида уменьшение потенциальной энергии магнита будет компенсироваться увеличением его кинетической энергии лишь частично. Некоторая часть начальной механической энергии магнита будет преобразовываться в энергию тока, которая в конечном итоге превратится в тепло.

Ответ: время падения магнита, проходящего через замкнутый соленоид, больше времени падения магнита, проходящего через незамкнутый соленоид.

ЗАДАЧА 2 В однородное магнитное поле с индукцией 0,6 Тл влетает протон со скоростью, перпендикулярной линиям магнитной индукции. Под действием магнитного поля его траектория искривляется, при этом радиус кривизны составляет 1 см. С какой скоростью двигался протон?

Дано:
 $B = 0,6 \text{ Тл}$
 $R = 1 \text{ см}$
 $m = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

 $v = ?$

СИ
 0,01 м

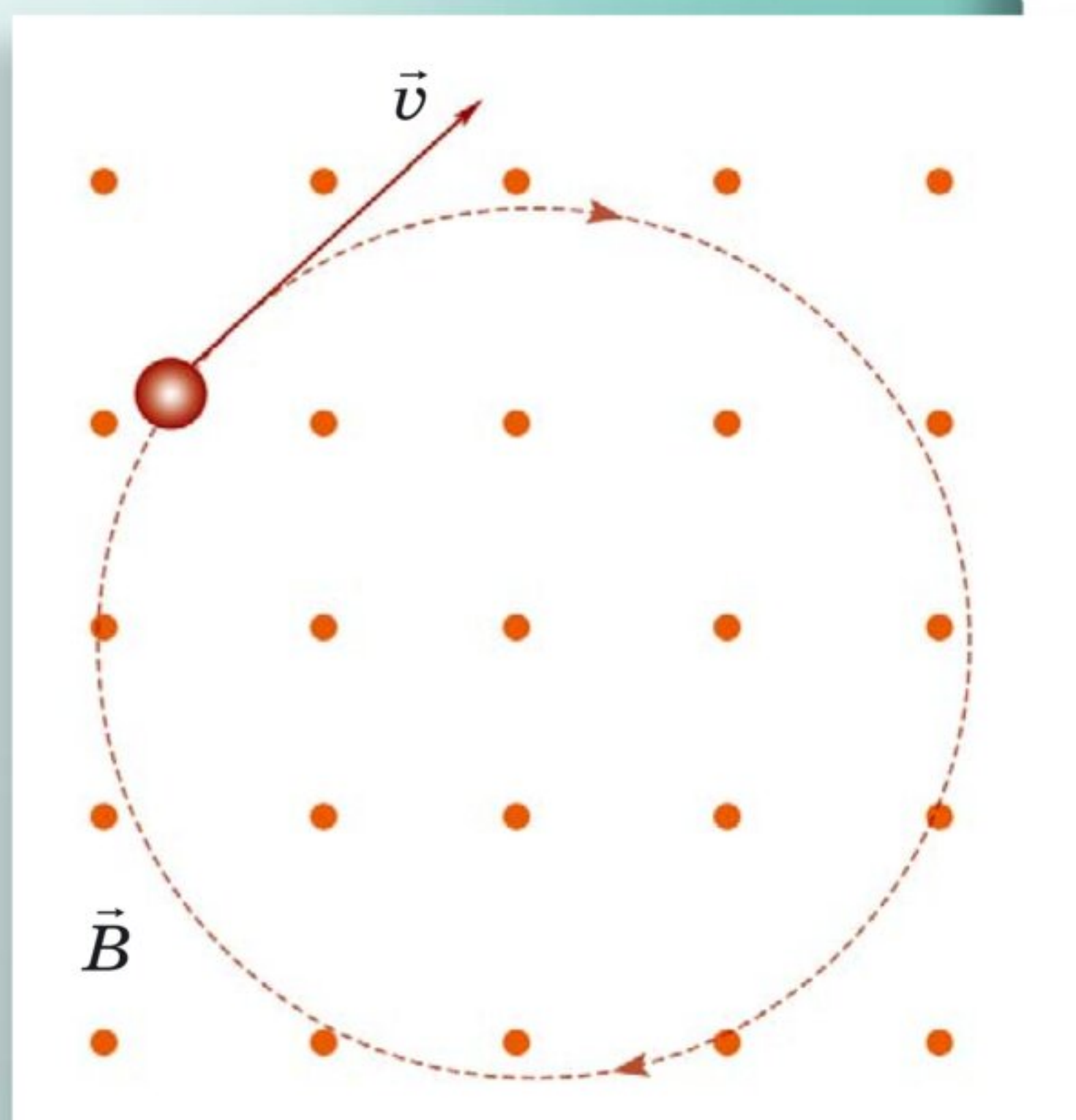
Решение:
 Учитывая условие задачи, сила Лоренца, действующая на частицу, равна
 $F_{\text{л}} = qvB$.
 Центробежное ускорение равно
 $a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}$.

По второму закону Ньютона

$$m \frac{v^2}{R} = qvB.$$

Отсюда скорость протона равна

$$v = \frac{qBR}{m}.$$



Подставив числовые значения, получим:

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,6 \text{ Тл} \cdot 0,01 \text{ м}}{1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 6 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v = 6 \cdot 10^5 \text{ м/с}$.

ЗАДАЧА 3 Катушка с площадью поперечного сечения 25 см^2 находится в магнитном поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$. Линии индукции магнитного поля ориентированы перпендикулярно плоскости сечения катушки. Сколько витков содержит эта катушка, если при отключении магнитного поля в катушке возникает ЭДС индукции 1 В ? Время отключения 5 мс .

Дано:
 $S = 25 \text{ см}^2$
 $B_1 = 0,1 \text{ Тл}$
 $B_2 = 0$
 $\mathcal{E}_i = 1 \text{ В}$
 $\Delta t = 5 \text{ мс}$

СИ
 $25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
 $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

Решение:

По закону электромагнитной индукции в катушке из N витков возникает ЭДС индукции

$$|\mathcal{E}_i| = N \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|.$$

Модуль изменения магнитного потока $|\Delta \Phi| = |(B_2 - B_1)|S$,

так как плоскость сечения катушки расположена перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Из написанных равенств находим

$$N = \frac{\mathcal{E}_i \Delta t}{|B_2 - B_1| S} = \frac{1 \text{ В} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{|0 - 0,1 \text{ Тл}| \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 20.$$

Ответ: $N = 20$.

ЗАДАЧА 4 Определите энергию магнитного поля катушки с индуктивностью $0,05 \text{ Гн}$, если магнитный поток через катушку составляет $0,2 \text{ Вб}$.

Дано:
 $L = 0,05 \text{ Гн}$
 $\Phi = 0,2 \text{ Вб}$

Решение:

Энергия магнитного поля рассчитывается по формуле

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

W — ?

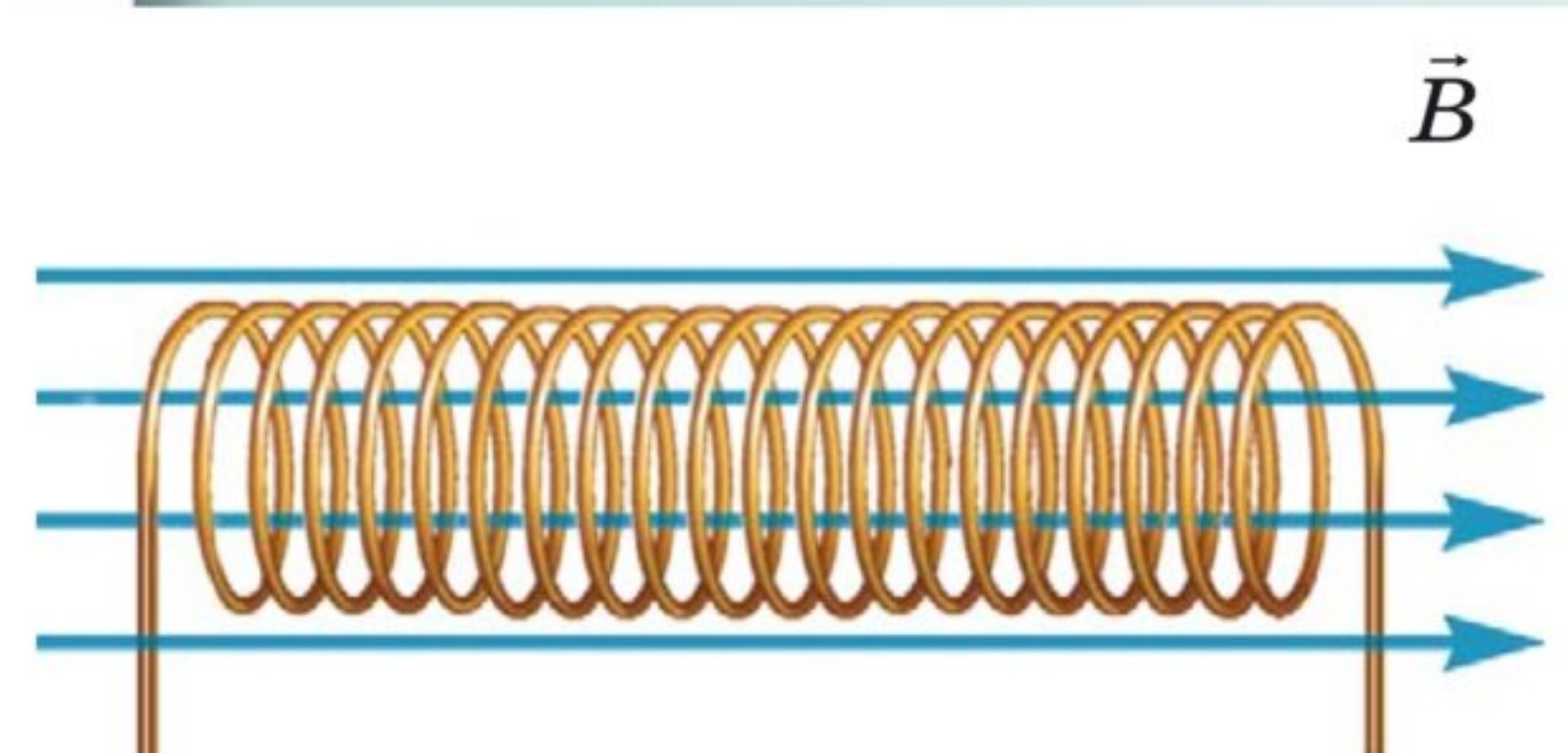
Силу тока в катушке можно найти через магнитный поток:

$$\Phi = LI \rightarrow I = \frac{\Phi}{L}.$$

В результате получим

$$W = \frac{L}{2} \left(\frac{\Phi}{L} \right)^2 = \frac{\Phi^2}{2L}; \quad W = \frac{(0,2 \text{ Вб})^2}{2 \cdot 0,05 \text{ Гн}} = 0,4 \text{ Дж}.$$

Ответ: $W = 0,4 \text{ Дж}$.



$$F = IBl \sin \alpha$$

СИЛА АМПЕРА

СИЛА ЛОРЕНЦА

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha$$

ПОТОК МАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО
ПОЛЯ

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- В пространстве, окружающем проводники с током, возникает магнитное поле.
- Физическую величину, являющуюся силовой характеристикой магнитного поля, называют индукцией магнитного поля или магнитной индукцией.
- Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называется силой Ампера.
- Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, называется силой Лоренца.
- Число линий магнитной индукции, проходящих через некоторую поверхность, характеризуют с помощью физической величины, называемой магнитным потоком.
- Явление электромагнитной индукции состоит в следующем: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в этом контуре возникает электрический ток, существующий в течение всего времени изменения магнитного потока.
- Правило Ленца позволяет определить направление индукционного тока, возникающего в замкнутом проводнике.

МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

ПОДРОБНЕЕ...

Большая книга экспериментов для школьников. — М.: Росмэн, 2001.

Суорц К.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 2. / К. Э. Суорц. — М.: Наука, 1987.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2001.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Может ли заряженная частица, двигаясь в магнитном поле, увеличить свою энергию за счёт энергии поля?
- В короткозамкнутую катушку сначала быстро, а затем медленно вдвигают магнит. Одинаковый ли заряд переносится при этом по виткам катушки?
- Как показал опыт, разность потенциалов между двумя произвольными точками замкнутого контура равна нулю, хотя ток в контуре существует. В каком случае это возможно?

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Научно-популярный
физико-математический
журнал «Квант»
<http://gotourl.ru/13725>



ОТ МАЯТНИКА К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЯМ



РАЗДЕЛ II

Знания об окружающем нас мире являются огромной ценностью. Они позволяют не только удовлетворить любопытство пытливого ума, но и являются основой технического прогресса человечества. С самого рождения человек получает большую часть информации об окружающем мире через зрение и слух, или, другими словами, через свет и звук. И звук, и свет — это колебания. В первом случае — это механические колебания частиц вещества, а во втором случае — это электромагнитные колебания.

В 1583 г. 19-летний Г. Галилей, наблюдая за раскачиванием лампы в Пизанском соборе, обнаружил, что период колебания маятника не зависит от амплитуды. Время он измерял по биению собственного пульса. Позднее в своей книге «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой» (1632 г.) он описывает опыты с двумя маятниками одинаковой длины: один — со свинцовым шаром, другой — с пробковым. Галилей обнаружил, что периоды их колебаний одинаковы. На основе этих опытов он делает вывод о том, что скорость свободного падения тел не зависит от их массы.

Исследования маятников Галилеем позволили создать часы с маятником, что дало возможность начать измерять время с гораздо более высокой точностью, чем это делалось в старинных механических часах. В середине XVII в. англичанин Р. Гук и нидерландец Х. Гюйгенс независимо друг от друга изобрели маятниковые часы с заменой гири пружиной. Первые такие часы были сделаны по указанию Гука для короля Карла II. В дальнейшем это изобретение привело к появлению наручных механических часов.

Галилей обнаружил, что колебания маятника могут нарастать под действием даже малой силы. Главное, чтобы действие этой силы регулярно повторялось в момент, когда груз маятника проходит нижнее положение в каком-нибудь одном направлении своего движения. Это явление называют резонансом. Свои опыты по изучению колебаний Галилей распространил на изучение звука. Изучением колеблющихся струн и связанных с этими колебаниями звуков занимался ещё Пифагор. Пифагор доказал, что гармоничные комбинации тонов создают струны с одинаковым натяжением, длины которых находятся в соотношении 2:1. Интервал таких тонов в музыке называют октавой. Галилей пошёл дальше Пифагора и определил количественную связь между физическими свойствами натянутой струны и частотой тона, который она издаёт. Он также утверждал, что высота звука определяется частотой колебаний, воздействующих на ухо. В дальнейшем эти результаты привели к появлению современной акустики.

В XVII в. ещё не было известно об электромагнитной природе света, но уже тогда Гюйгенс сформулировал волновые представления о природе света в своём «Трактате о свете», который вышел в 1690 г. В начале XIX в. английский физик Юнг поставил опыты по интерференции и дифракции света, экспериментально подтвердившие представления Гюйгенса о волновой природе света.





Впервые указания связи света и магнетизма были получены в опытах Фарадея. Но эта связь стала понятна только через 20 лет, когда Максвелл написал свои знаменитые уравнения, связывающие электричество и магнетизм. Для изучения механических колебаний были необходимы нитяной и пружинный маятники. Что является таким «маятником» при изучении электромагнитных колебаний? Таким «маятником» является простейший колебательный контур, в котором происходят электрические колебания при разряде конденсатора через индукционную катушку. Опыты с таким колебательным контуром проводили французский физик Савар и американский физик Генри. Таким образом, появился метод получения быстрых переменных движений электрического заряда и волн, предсказанных Фарадеем и Максвеллом.

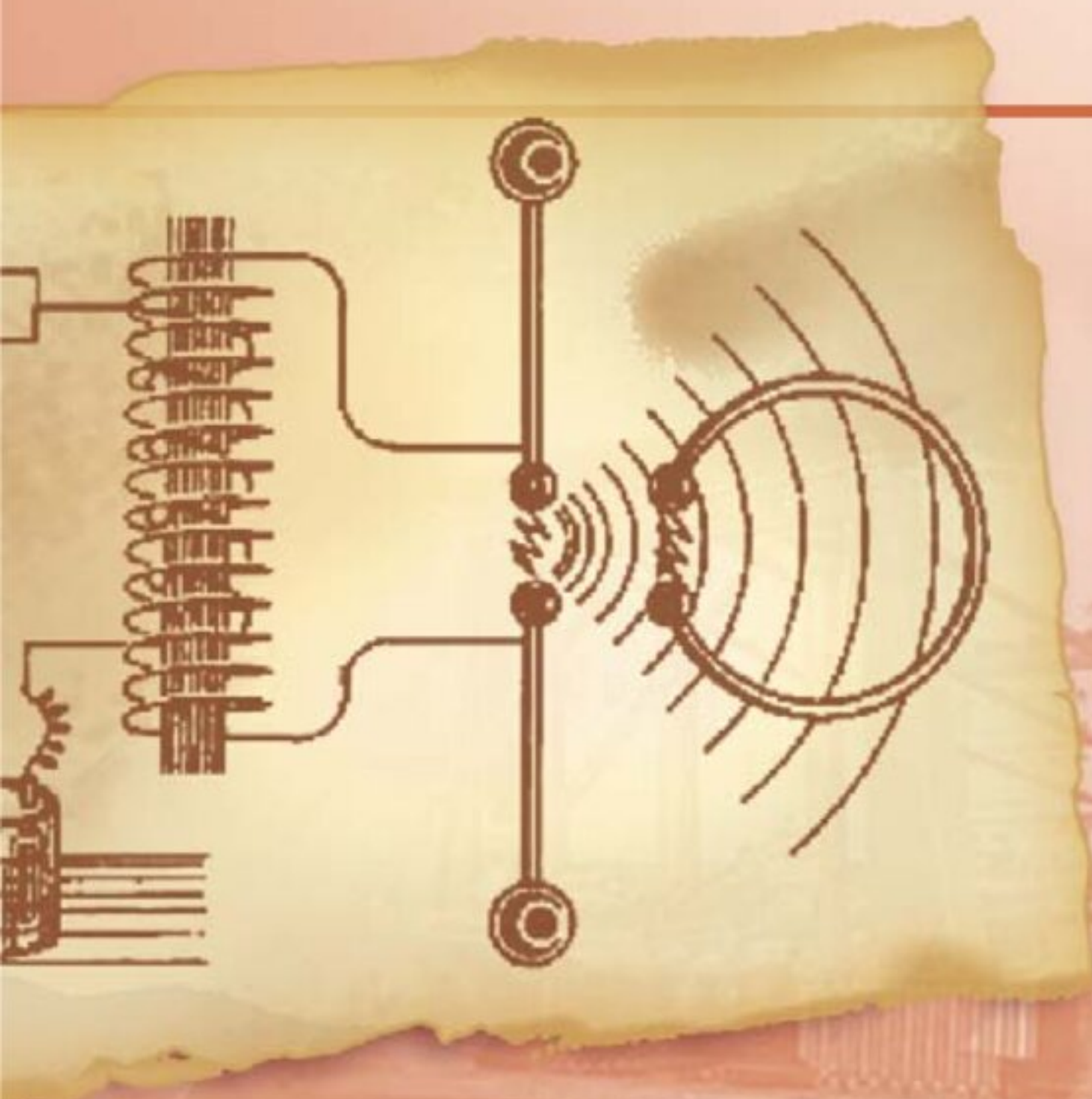


В 1888 г. Герц завершил свои эксперименты и подтвердил предсказания теории Максвелла — открыл электромагнитные волны и установил прямолинейность их распространения. Герц экспериментально подтвердил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. За открытием Герца последовал лавинный рост изобретений и открытий, кардинально изменивший наш мир. Самые знаковые из них — радио, телевидение. В изобретение радио и телевидения большой вклад внесли наши соотечественники А. С. Попов и В. К. Зворыкин. А. Попов в 1888 г. повторил опыты Г. Герца, а через год указал на возможность использования электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние. 7 мая 1895 г. он продемонстрировал свой первый радиоприёмник в сеансе радиотелеграфии, где источником электромагнитных волн служил вибратор Герца. Через год Попов продемонстрировал передачу радиосигналов на 250 м. Первая переданная по радио (азбукой Морзе) телеграмма содержала лишь два слова: «Генрих Герц». Своё открытие Попов не запатентовал, и патент на изобретение радио получил в 1897 г. итальянский физик, инженер и предприниматель Г. Маркони.



Зворыкин — выпускник Санкт-Петербургского технологического института, который он окончил в 1912 г. В годы своего обучения он под руководством профессора Б. Л. Розинга участвовал в первых опытах в области «дальновидения». Начиная с 1919 г. Зворыкин свои исследования передачи изображения на расстояния проводил в Америке, куда он уехал из России. Первую свою патентную заявку на изобретение телевидения, осуществляемого полностью на электронном принципе, он подал в 1923 г. В 1929—1931 гг. Зворыкин разработал два ключевых элемента телевидения: приёмную трубку — кинескоп и передающую трубку — иконоскоп. В 1940-е гг. он разбил световой луч на синий, красный и зелёный цвета и таким образом получил цветное телевидение.

Окружающий нас мир поразительно многообразен. Часть явлений доступна непосредственному восприятию наших органов чувств, другие же Природа скрыла от нас. Но человеческий гений не только обнаружил явления электричества и магнетизма, но и изучил их, понял их законы и взаимосвязи и обратил их на пользу человечеству. Открытие электромагнитных волн изменило нашу цивилизацию — мы живём в едином информационном пространстве, в котором информация о любом событии может быть передана в любой уголок Земли с самой большой скоростью во Вселенной — скоростью света.





Глава 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

- МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
- ПРУЖИННЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИКИ. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
- ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ
- РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СВОБОДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
- ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ II



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Рождѣнный пустыней,
Колеблется звук,
Колеблется синий
На нитке паук.
Колеблется воздух,
Прозрачен и чист,
В сияющих звѣздах
Колеблется лист.

Н. Заболоцкий

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие колебания называют свободными.
- Что такое период и частота колебаний.
- Что такое амплитуда колебаний.

ВСПОМНИТЕ:

- Какое движение тела называется колебательным?
- Что такое период и частота обращения тела при движении по окружности?

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В окружающем нас мире мы часто наблюдаем движения, которые повторяются с течением времени. Это могут быть колебания маятника часов, колебания струн музыкальных инструментов, движение качелей и т.п. Общим для всех этих параметров является многократное повторение одного и того же цикла движений. Поскольку в основной школе вы уже познакомились с некоторыми характеристиками механических колебаний, то теперь продолжим рассмотрение колебательных движений на количественном уровне.

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ Если тело, подвешенное на пружине, оттянуть вниз и отпустить, то оно будет колебаться без всякого внешнего воздействия. То же самое происходит и с качелями, которые после толчка будут некоторое время раскачиваться без нашего воздействия на них. В обоих случаях за счёт работы внешней силы колебательной системе был сообщён некоторый запас механической энергии. Колебания, происходящие только за счёт первоначального запаса энергии системы, называют **свободными колебаниями**. На тело, подвешенное на пружине, действуют сила тяжести со стороны Земли и сила упругости со стороны пружины. В этом случае колебательная система состоит из тела, пружины и Земли, и колебания совершаются под действием **внутренних сил** системы. Аналогичным образом осуществляются колебания в системе, состоящей из груза, подвешенного на нити, и Земли. Поэтому свободными колебаниями можно назвать колебания, которые происходят под действием внутренних сил системы.

В процессе колебаний при отклонении тела от положения устойчивого равновесия равнодействующая всех сил, приложенных к телу, стремится возвратить его в положение равновесия. Эту равнодействующую сил часто называют **возвращающей силой**.

При движении к положению равновесия тело вследствие инерции проходит это положение и отклоняется в противоположную сторону. При этом снова возникает возвращающая сила, направленная к положению равновесия. И если силы трения или силы сопротивления в системе достаточно малы, то колебания могут продолжаться длительное время.

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ При всём разнообразии колебательных движений у них есть одна общая черта: через определённый промежуток времени движение тела повторяется. Такие движения, при которых значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний, повторяются через равные промежутки времени,



называют **периодическими**. Среди разнообразия колебательных процессов, включая свободные и вынужденные колебания, нас в первую очередь будут интересовать именно **периодические движения**.

ПЕРИОД И ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ Периодическая повторяемость колебательного движения позволяет ввести одну из его важнейших характеристик — **период колебаний**. Периодом колебаний называют минимальный промежуток времени, через который движение тела полностью повторяется. Период колебаний обозначают буквой T и в СИ измеряют в секундах.

Аналогично периоду и частоте обращения тела по окружности, колебательное движение характеризуется не только периодом, но и частотой.

Частота колебаний — это число колебаний в единицу времени. Обычно частоту колебаний обозначают греческой буквой ν . Например, если тело совершает одно полное колебание за время $T = 0,25 \text{ с}$, то за 1 с тело совершит четыре колебания, т. е.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,25 \text{ с}} = 4 \text{ с}^{-1}.$$

Из этого примера следует, что частота колебаний является величиной, обратной периоду колебаний.

Единицей частоты является одно колебание в секунду, т. е. $1/\text{с}$, или с^{-1} . Эту единицу называют **герцем (Гц)** в честь немецкого физика Генриха Герца:

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ Ещё одной важной характеристикой колебательного движения является **амплитуда колебаний** — наибольшее по модулю смещение тела от положения равновесия.

Если в качестве колебательной системы рассматривать груз, подвешенный на нити, то максимальное отклонение $OA = OA'$ груза от положения равновесия и будет являться амплитудой A колебаний. Амплитуду измеряют в единицах длины, например в СИ — в метрах.

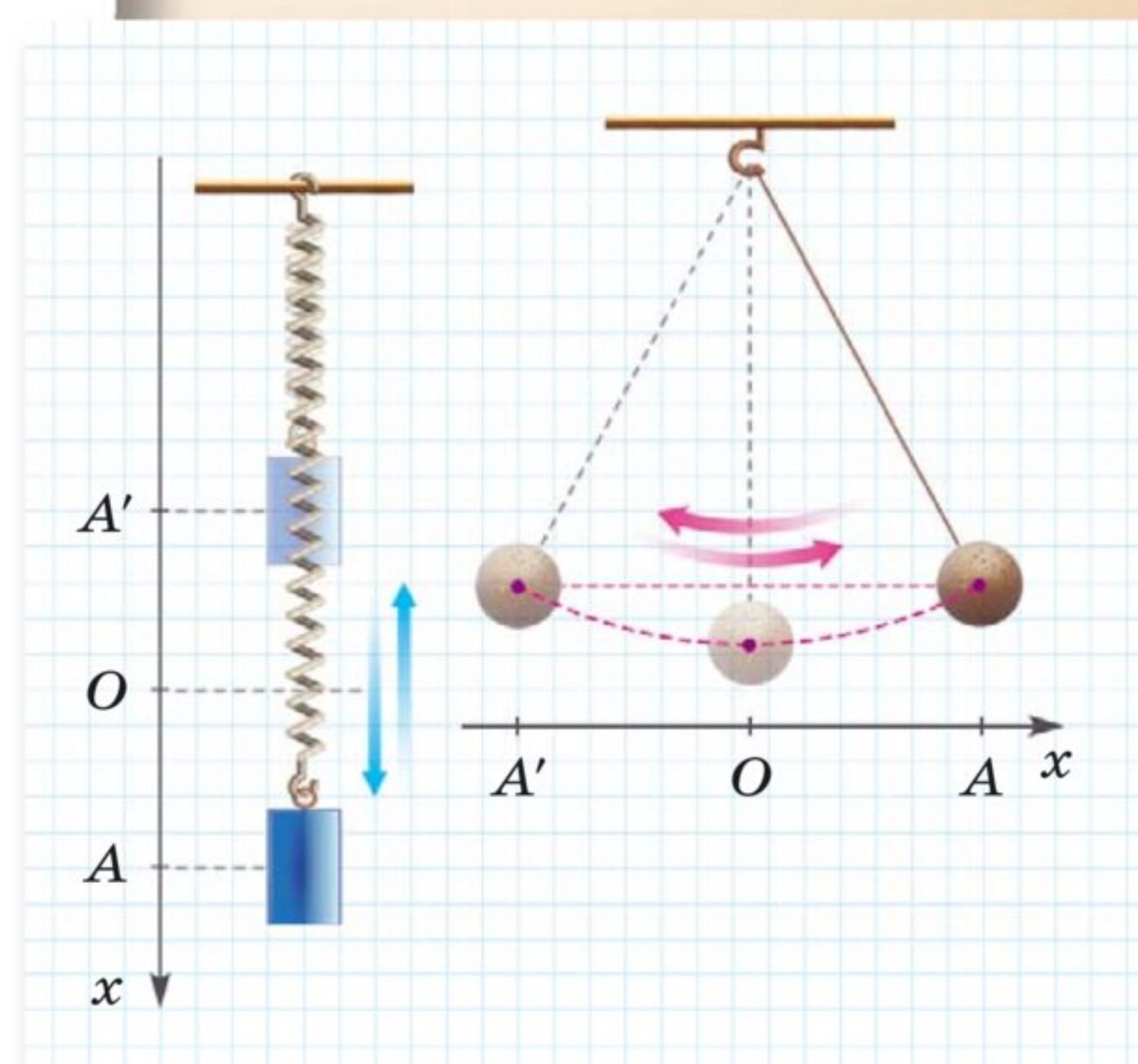
Как показывает опыт, амплитуда колебаний зависит от начального отклонения тела от положения равновесия, а также от того, какая скорость сообщается при этом телу.



Колебания очень распространены в окружающем нас мире и охватывают огромную область физических явлений и технических процессов. В частности, закономерности, описывающие колебания, используют в судостроении, авиационном строительстве, электротехнике и т. д. Радиопередача и радиоприём, телевидение и телефония, локация и средства навигации также основаны на базовых принципах колебательных движений.

Если обозначить величины: частота колебаний — ν , период колебаний — T , то связь между этими физическими величинами можно выразить формулой

$$\nu = \frac{1}{T}.$$



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

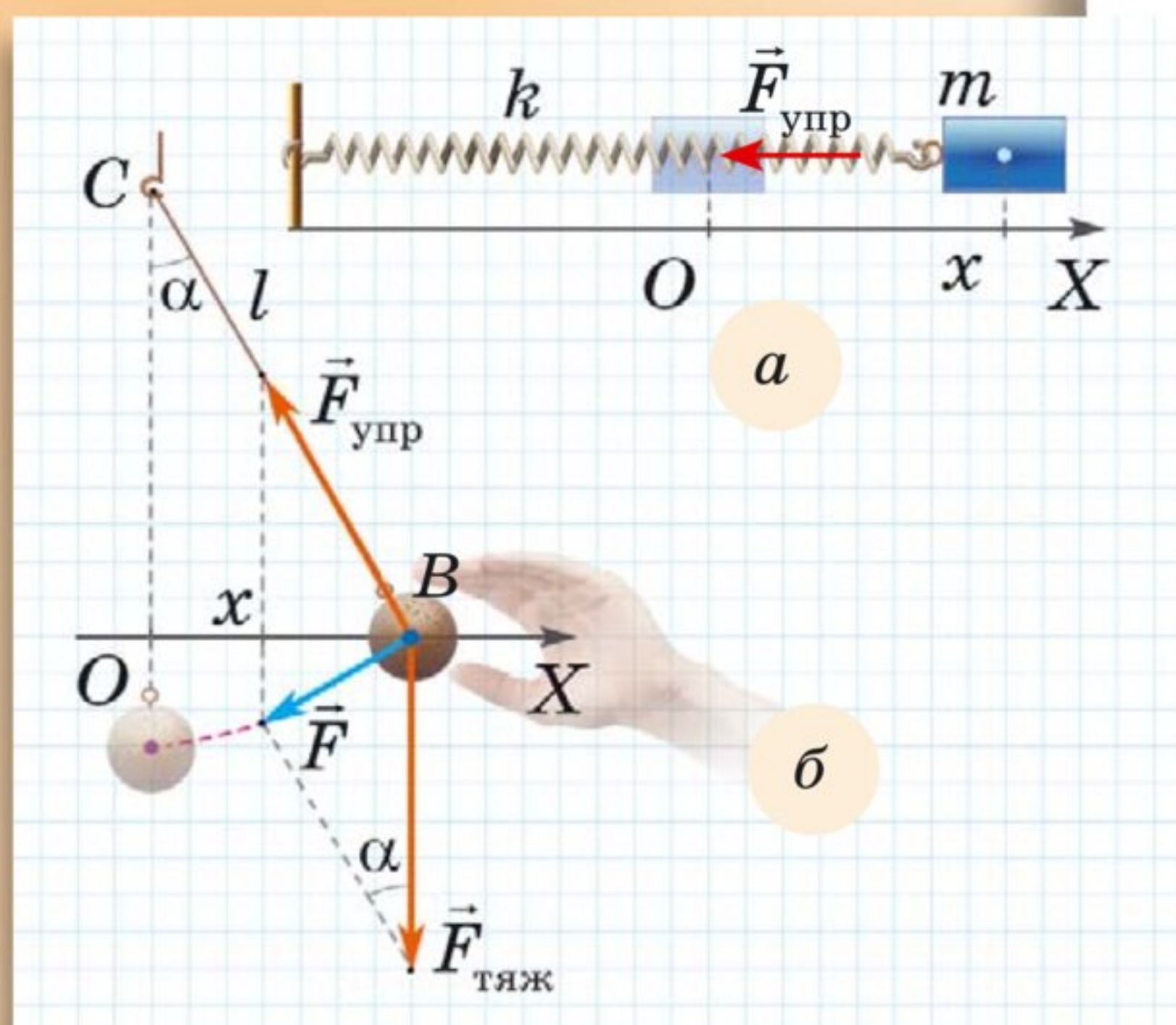
- Что такое колебательная система? Приведите примеры колебательных систем.
- Провода линии электропередачи раскачиваются под действием ветра. Являются ли эти колебания свободными?
- Какие колебания называют периодическими и каковы их основные характеристики?
- Период колебаний уменьшили на $\frac{1}{5}$ от его первоначального значения. Как и насколько при этом изменилась частота колебаний?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие силы действуют на груз при колебаниях пружинного маятника.
- Какие силы действуют на груз при колебаниях математического маятника.
- Какие колебания называют гармоническими.
- Что представляет собой график гармонических колебаний.
- По какой формуле вычисляют период колебаний пружинного маятника.
- По какой формуле вычисляют период колебаний математического маятника.

ВСПОМНИТЕ:

- Как записывается закон Гука?
- Как записывается второй закон Ньютона?
- Что такое период, частота и амплитуда колебаний?



При изучении колебаний пружинного маятника груз обычно подвешивают к пружине, при этом на него в вертикальном направлении, кроме силы упругости, будет действовать также и сила тяжести. Однако период колебаний маятника по-прежнему будет определяться формулой (3).

ПРУЖИННЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИКИ. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Среди многообразия колебательных процессов особое место занимают колебания, которые называют гармоническими. Этот вид колебаний можно наглядно продемонстрировать на примерах колебаний пружинного и нитяного (математического) маятников.

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК Рассмотрим колебательную систему, состоящую из пружины с прикрепленным к ней грузом **а**. При этом свободный конец пружины прикреплен к стенке, а груз может двигаться по горизонтальной поверхности практически без трения. Массой пружины пренебрегаем. Направим ось Ox вдоль плоскости, выбрав в качестве начала отсчета положение груза, когда пружина не деформирована. В этом положении сила упругости, скорость груза и его ускорение равны нулю. Выведем груз из положения равновесия, растянув пружину на некоторую величину x . При этом на тело со стороны пружины будет действовать упругая сила, которая согласно закону Гука зависит от жесткости пружины k и пропорциональна смещению тела от положения равновесия: $F_{\text{упр}} = -kx$. Знак «минус» в формуле означает, что направление силы упругости противоположно направлению смещения груза. Следовательно, в процессе колебаний маятника на груз со стороны пружины действует возвращающая сила, всегда направленная к положению равновесия.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК Рассмотрим колебания математического (нитяного) маятника, состоящего из груза, подвешенного на нити **б**. При этом нить полагается невесомой и нерастяжимой. Если груз отклонить от положения равновесия на некоторую величину x , то на него будет действовать равнодействующая сил тяжести и упругости: $\vec{F} = \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{упр}}$. Хотя движение груза после его освобождения происходит по дуге окружности, при малых углах отклонения различием между длиной дуги и величиной смещения можно пренебречь.

Проекция силы тяжести на касательное направление к траектории движения груза равна $F_{\tau} = F = mg \sin \alpha$.

Из треугольника OBC находим, что $\sin \alpha = x/l$, где l — длина нити. Следовательно, модуль равнодействующей силы $F = mgx/l$.

Если обозначить $mg/l = k$, то выражение для модуля возвращающей силы, действующей на груз, можно записать так же, как и в случае колебаний пружинного маятника: $F = kx$. При этом направление силы также противоположно направлению смещения груза: $F_x = -kx$.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ Запишем уравнение второго закона Ньютона, описывающего движение груза в каждом из рассмотренных случаев:

$$ma_x = -kx. \quad (1)$$

Разделив обе части уравнения (1) на m , получим:

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (2)$$

Как следует из уравнения (2), проекция a_x ускорения тела прямо пропорциональна его смещению из положения равновесия, а само ускорение направлено к положению равновесия. Колебания, для которых выполняются эти условия, называют гармоническими.

Таким образом, мы пришли к важному выводу: колебания таких различных систем, как пружинный и нитяной маятники, описываются одним и тем же уравнением и являются гармоническими. Смещение x зависит от времени по закону синуса или косинуса, т. е. описывается гармоническими функциями. Одним из замечательных свойств гармонических колебаний является тот факт, что период (и, соответственно, частота) колебаний не зависит от их амплитуды.

ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА Как показывает опыт, если подвешивать к пружине грузы разной массы, то с увеличением массы период колебаний увеличивается. Если же один и тот же груз подвешивать к пружинам разной жёсткости, то можно убедиться в том, что с увеличением жёсткости пружины период колебаний уменьшается.

Строгое решение уравнения (1) движения груза позволяет получить формулу для периода колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3)$$

ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Качественную зависимость периода колебаний математического маятника от массы груза и длины нити не трудно установить опытным путём.

Как показывает опыт, период колебаний не зависит от массы груза и определяется только длиной нити: **при увеличении длины нити период колебаний возрастает**. Например, для увеличения периода колебаний вдвое длину нити нужно увеличить в 4 раза. Согласно расчёту, формула для периода колебаний математического маятника записывается в виде

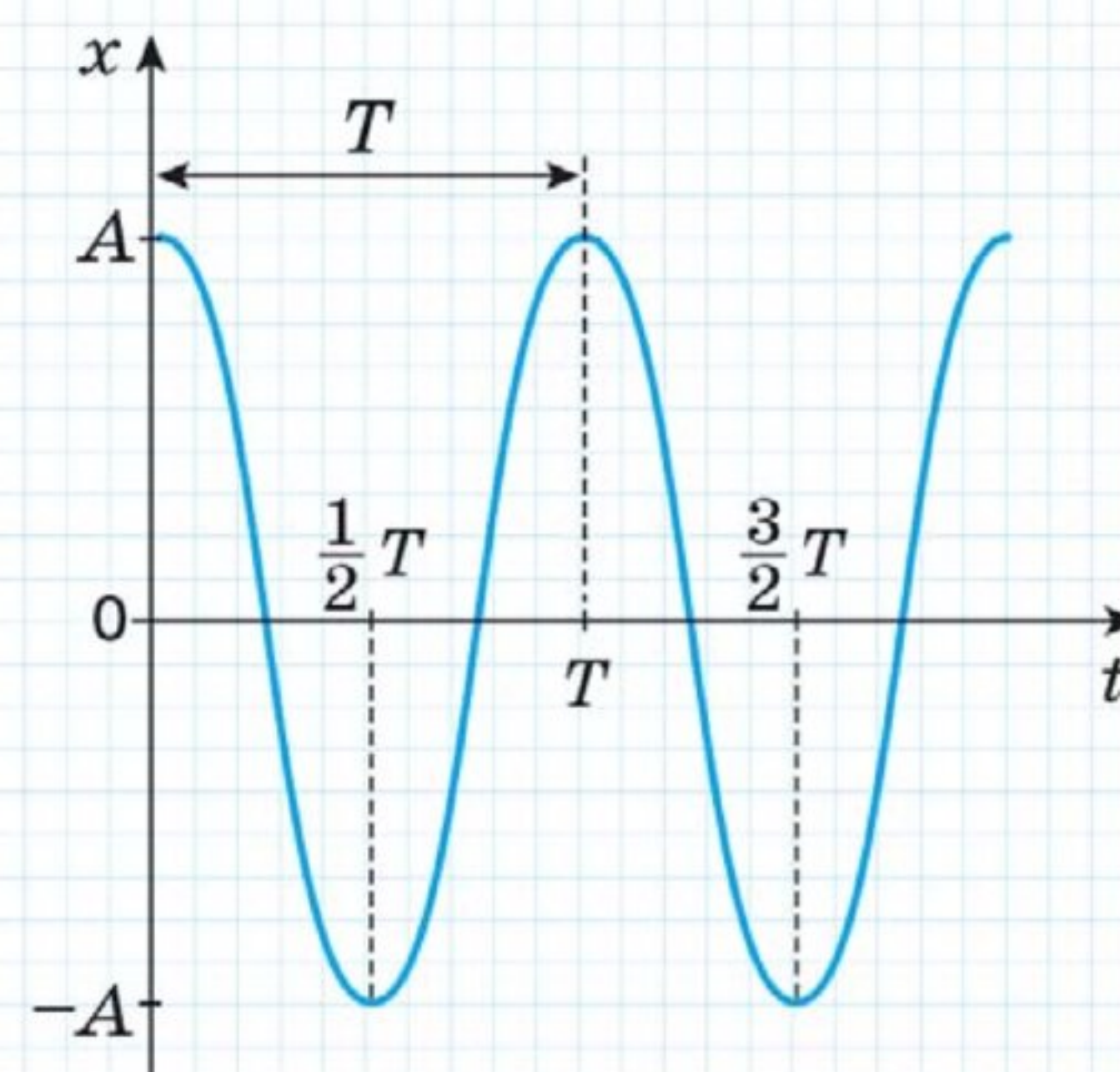
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (4)$$

Как следует из формулы (4), период колебаний зависит также от ускорения свободного падения g в том месте, где находится маятник.

Если обозначить величины: масса груза — m , жёсткость пружины — k , то период колебаний пружинного маятника можно рассчитать по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

График зависимости $x(t)$ для гармонических колебаний



Если обозначить величины: длина нити маятника — l , ускорение свободного падения — g , то период колебаний математического маятника можно рассчитать по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

ВОПРОСЫ:

- Что такое пружинный и математический маятники?
- Какие колебания называют гармоническими?
- Как графически изображаются гармонические колебания?
- Длину нити математического маятника увеличили на $1/4$ от её первоначальной длины. Как и во сколько раз при этом изменилась частота колебаний маятника?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие превращения механической энергии происходят при колебаниях пружинного и математического маятников.
- От каких физических величин зависит полная механическая энергия колебательной системы.
- Как силы трения влияют на характер колебательных движений.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое пружинный и математический маятники?
- Что такое амплитуда колебаний?
- От каких физических величин зависят потенциальная и кинетическая энергии?
- В чём заключается закон сохранения механической энергии?

$$t = 0, x = A, v = 0, E_{\text{п}} = \frac{kA^2}{2}, E_{\text{к}} = 0$$

$$t = \frac{1}{4}T, x = 0, v = v_{\text{max}}, E_{\text{п}} = 0, E_{\text{к}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

$$t = \frac{1}{2}T, x = -A, v = 0, E_{\text{п}} = \frac{kA^2}{2}, E_{\text{к}} = 0$$

Незатухающие свободные колебания могут осуществляться только в отсутствие сил трения. При этом механическая энергия колебательной системы сохраняется.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Уравнение гармонических колебаний позволяет установить зависимость координаты и проекций скорости и ускорения тела от времени. Вместе с тем от значений координат и скорости тела зависит механическая энергия колебательной системы. Какие превращения энергии происходят при этом в процессе колебаний? Как изменится энергия колебаний в реальных условиях, т. е. при учёте сил трения и сил сопротивления среды?

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Превращение энергии при гармонических колебаниях удобно обсуждать на примере колебательной системы, состоящей из лёгкой пружины и прикрепленного к ней шарика с отверстием. Свободный конец пружины прикреплен к стойке, а шарик без трения скользит по проходящему через отверстие гладкому стержню.

Выведем груз из положения равновесия, растянув пружину на некоторую величину $x = A$. В результате колебательной системе будет сообщён запас потенциальной энергии, равный $kA^2/2$, где k — жёсткость пружины. Если груз освободить, то при его движении пружина будет сокращаться, а потенциальная энергия соответственно уменьшаться. Но одновременно будет увеличиваться скорость движения груза и, следовательно, его кинетическая энергия. При прохождении шарика через положение равновесия потенциальная энергия пружины становится равна нулю, тогда как кинетическая энергия тела достигает своего максимального значения.

После прохождения телом положения равновесия пружина начинает сжиматься, а скорость уменьшаться. Следовательно, будет уменьшаться и кинетическая энергия. Вместе с тем по мере сжатия пружины будет увеличиваться потенциальная энергия системы. В момент, когда отклонение шарика от положения равновесия станет равно амплитуде A , потенциальная энергия вновь достигнет своего максимального значения $kA^2/2$, а кинетическая энергия окажется равна нулю.

Таким образом, при колебаниях через каждую четверть периода происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно — кинетической в потенциальную. При этом частота изменения энергии вдвое больше частоты колебаний тела, поскольку потенциальная энергия не зависит от знака деформации пружины, а кинетическая энергия — от знака проекции скорости.

Полная механическая энергия груза, колеблющегося на пружине, равна сумме кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (1)$$

Если трение в системе пренебрежительно мало, то при свободных колебаниях полная механическая энергия системы согласно закону сохранения энергии остаётся неизменной: $E = \text{const}$. В момент наибольшего отклонения тела от положения равновесия полная механическая энергия равна максимальному значению потенциальной энергии $kA^2/2$, а в момент, когда тело проходит положение равновесия, — максимальному значению кинетической энергии

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

По закону сохранения механической энергии

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

Из равенства (2) нетрудно получить связь между амплитудой колебаний и максимальным значением скорости:

$$v_{\text{max}} = A\sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

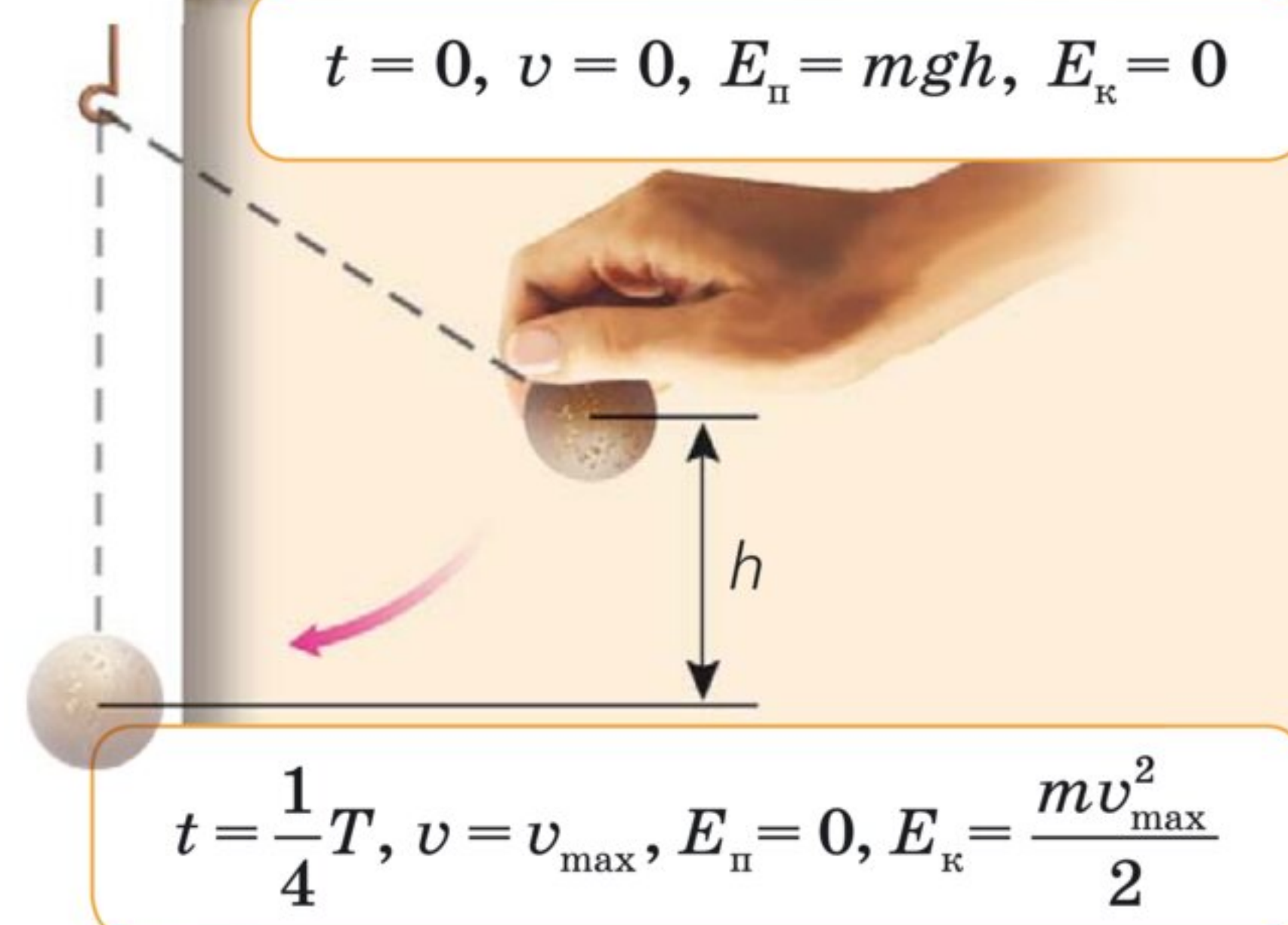
Согласно равенству (2), полная механическая энергия пропорциональна квадрату амплитуды. Например, если амплитуда колебаний увеличивается вдвое, то механическая энергия системы увеличивается в четыре раза.

Превращение механической энергии можно наблюдать также при колебаниях математического маятника. Если за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии в поле тяжести принять положение равновесия маятника, то при отклонении груза на некоторую высоту h его потенциальная энергия будет максимальна и равна $E_{\text{п}} = mgh$. После освобождения маятника потенциальная энергия груза переходит в энергию кинетическую, причём в нижней точке траектории потенциальная энергия принимает нулевое значение, а кинетическая энергия будет максимальна. Согласно закону сохранения механической энергии

$$E = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = mgh. \quad (4)$$

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ Выполнение равенств (2) или (4) возможно только в том случае, когда на колеблющееся тело не действуют силы трения и силы сопротивления среды. Под влиянием сил трения происходит уменьшение амплитуды колебаний, и через некоторое время колебания прекращаются. При этом механическая энергия колебательной системы расходуется на совершение работы по преодолению сил трения и сопротивления среды и переходит в конечном итоге во внутреннюю энергию тел. Такие колебания называют **затухающими**. Очевидно, чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее затухают колебания. Можно достаточно долго наблюдать колебания пружинного маятника в воздухе, поскольку в этом случае силы трения сравнительно невелики. Однако если возбудить колебания маятника в вязкой среде, например в глицерине, то амплитуда колебаний будет уменьшаться очень быстро.

$$t = 0, v = 0, E_{\text{п}} = mgh, E_{\text{к}} = 0$$



Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее затухают колебания.



ВОПРОСЫ:

- Пружинный маятник осуществляет свободные незатухающие колебания с амплитудой A . Чему равно отклонение от положения равновесия маятника в момент, когда его кинетическая энергия равна потенциальной?
- Как полная механическая энергия свободных колебаний зависит от амплитуды колебаний?
- Могут ли в реальных условиях наблюдаться свободные незатухающие колебания?
- Являются ли затухающие колебания периодическими?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как записывают уравнение гармонических колебаний.
- Как записывают решение уравнения свободных гармонических колебаний.
- Что такое циклическая и собственная частота колебаний.
- Что такое фаза колебаний.

ВСПОМНИТЕ:

- Как записывают уравнение движения маятника?
- Какие функции в математике называются гармоническими?
- Какими физическими величинами описывают колебательное движение?
- Как взаимосвязаны частота и период колебаний?

Можно показать, что любые колебания достаточно малой амплитуды вблизи положения равновесия происходят по гармоническому закону. Кроме механических, по этому закону осуществляются и электромагнитные колебания.



Если обозначить величины: отклонение груза маятника от положения равновесия — x , амплитуда колебаний — A , период колебаний — T , то зависимость от времени смещения груза от положения равновесия описывается формулой

$$x = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СВОБОДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Установленная в предыдущем параграфе прямая пропорциональная зависимость между проекцией ускорения и координатой груза маятника позволяет с помощью математических методов найти зависимость координаты от времени.

УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Как известно из курса математики, скорость тела представляет собой производную координаты по времени: $v_x = x'$. Аналогично, ускорение показывает, насколько быстро изменяется скорость тела, т.е. является производной скорости по времени или второй производной координаты по времени: $a_x = x''$. Поэтому уравнение движения груза пружинного маятника можно записать в виде

$$mx'' = -kx. \quad (1)$$

Это уравнение можно записать иначе, если ввести обозначение $\frac{k}{m} = \omega_0^2$:

$$x'' = -\omega_0^2 x. \quad (2)$$

Уравнение (2) является уравнением свободных незатухающих гармонических колебаний. Согласно этому уравнению, координата x изменяется со временем таким образом, что вторая производная координаты по времени прямо пропорциональна самой координате и противоположна ей по знаку. Как доказывается в курсе математического анализа, тригонометрические функции синус и косинус обладают именно таким свойством: их вторые производные прямо пропорциональны самим функциям, взятым с противоположным знаком. Это означает, что координата груза, совершающего свободные колебания, изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Если в уравнение (2) подставить решение в виде $x = A \sin t$ или $x = A \cos t$, то мы не получим тождественного равенства левой и правой части уравнения. Дело в том, что в правой части уравнения (2) имеется сомножитель ω_0^2 , поэтому аргумент синуса или косинуса должен зависеть не только от времени t , но и от величины ω_0 . Прямыми вычислениями нетрудно убедиться в том, что решением уравнения (2) является функция:

$$x = A \sin(\omega_0 t). \quad (3)$$

Действительно, первая производная $x' = \omega_0 A \cos(\omega_0 t)$. Соответственно вторая производная равна

$$x'' = -\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t) = -\omega_0^2 x.$$

Таким образом, получено уравнение (2), и, следовательно, функция (3) является решением этого уравнения.

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ Как известно из курса тригонометрии, синус и косинус являются периодическими функциями. Если период колебаний тела равен T , то при увеличении аргумента функции (3) на $\omega_0 T$ отклонение тела от положения равновесия принимает первоначальное значение. Поскольку наименьший период синуса (косинуса) равен 2π , то должно выполняться равенство $\omega_0 T = 2\pi$. Отсюда получаем, что

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (4)$$

Из формулы (4) становится понятным физический смысл величины ω_0 : это число колебаний тела за 2π секунд. Величину ω_0 называют **циклической** или **круговой частотой**. В отличие от частоты ν , которую измеряют в герцах, циклическую частоту измеряют в радианах в секунду (рад/с). Частоту свободных колебаний ν или ω_0 часто называют **собственной частотой колебательной системы**.

ФАЗА КОЛЕБАНИЙ Легко проверить, что решением уравнения (2) будет также являться функция (3), у которой аргумент увеличен на некоторую постоянную величину φ_0 :

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (5)$$

Величину $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, являющуюся аргументом синуса или косинуса, называют **фазой колебания**. Значение фазы в момент времени $t = 0$ $\varphi = \varphi_0$ называют **начальной фазой**. Фаза выражается в угловых единицах — радианах или градусах.

Если известны амплитуда и собственная частота колебаний, то фаза полностью определяет состояние колебательной системы, т.е. позволяет найти значения координат и проекций скорости и ускорения тела в произвольный момент времени.

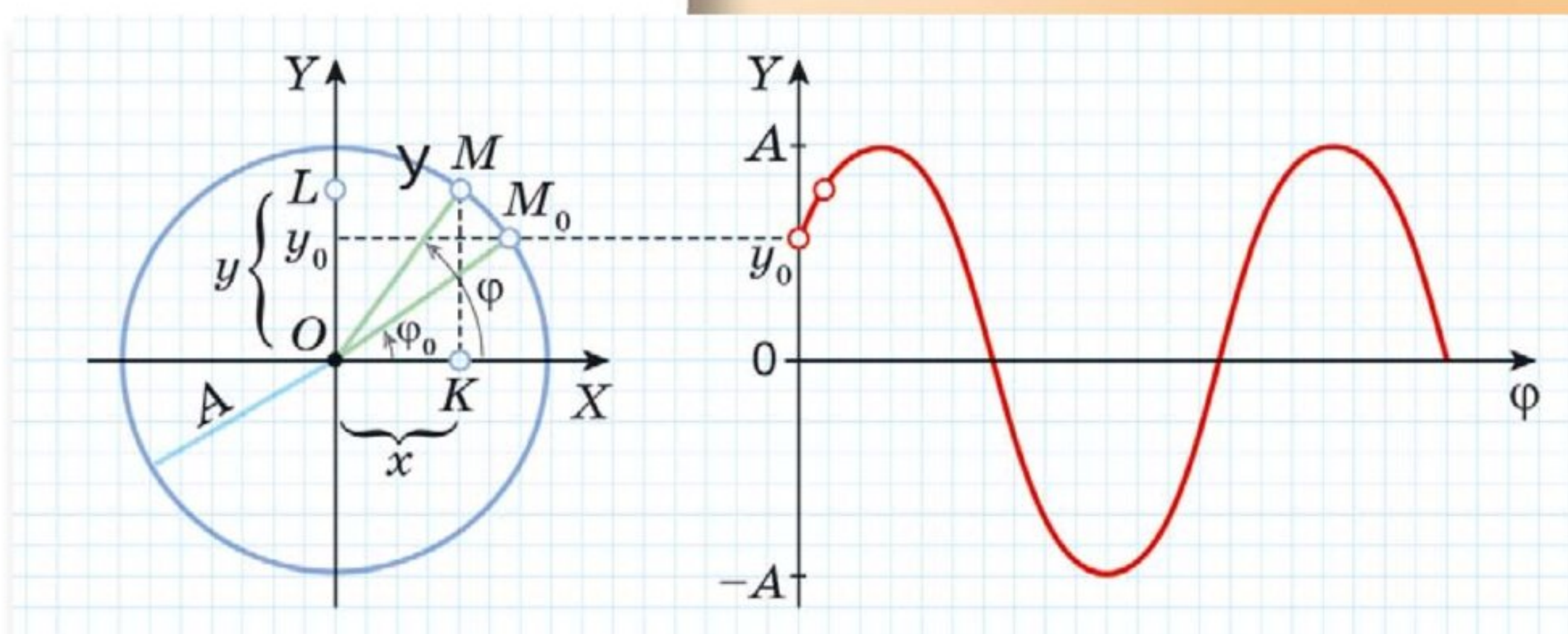
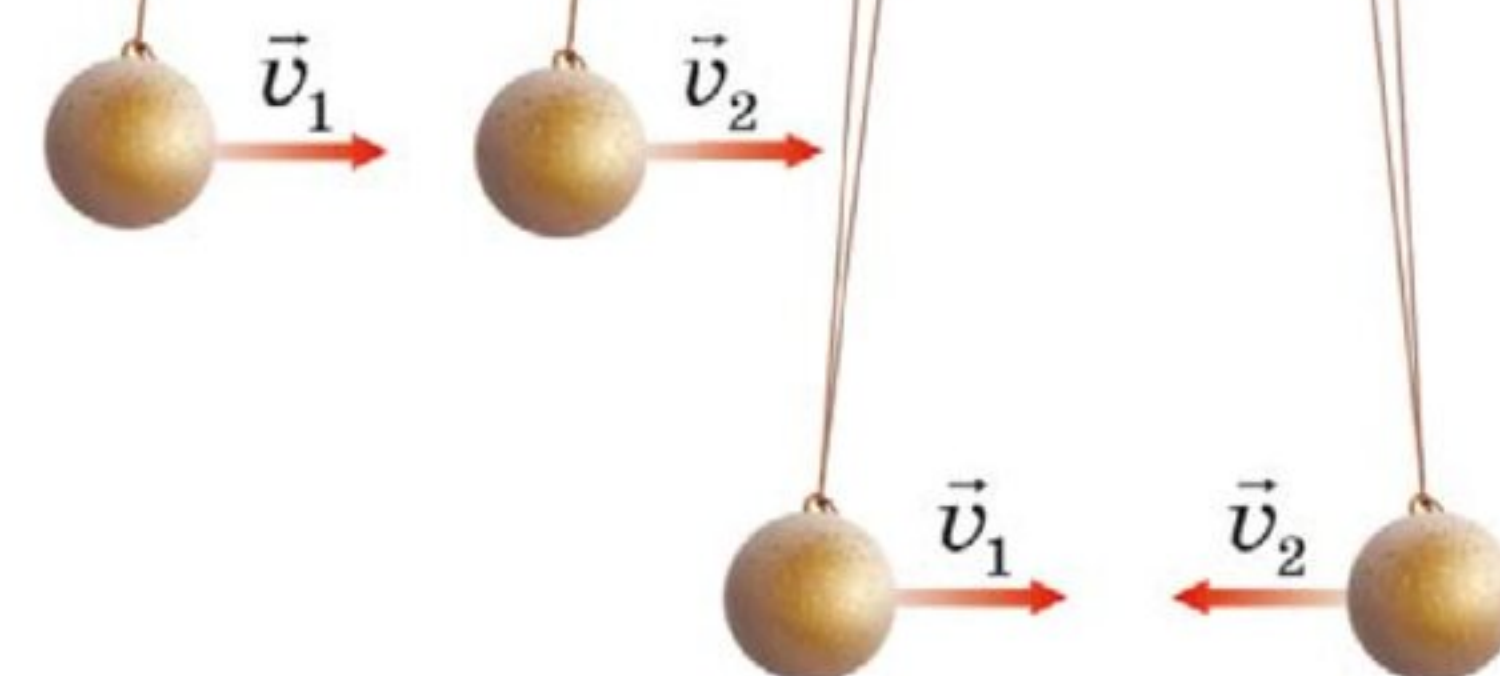
В качестве примера, поясняющего физический смысл фазы, рассмотрим равномерное движение материальной точки M по окружности против часовой стрелки. Движение точки из начального положения M_0 характеризуется углом φ_0 , который образует радиус OM с осью OX . По мере движения точки M её проекции K и L на оси координат будут совершать колебательное движение с одинаковой амплитудой, равной радиусу окружности $A = OM$. Поскольку положение проекций точки M на оси OX и OY определяется углом φ , причём $x = A \cos \varphi$, $y = A \sin \varphi$, то точки K и L действительно совершают гармонические колебания. Если по оси абсцисс откладывать угол φ , а по оси ординат — величину y , то мы получим синусоиду — график зависимости координаты y от φ : $y = A \sin(\omega t + \varphi_0)$. При этом график будет начинаться не из начала координат, поскольку в начальный момент $t = 0$ $y_0 = A \sin \varphi_0$.

Если период гармонических колебаний тела равен T , то циклической (круговой) частотой называют величину

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}.$$

Маятники колеблются в одинаковых фазах

Маятники колеблются в противоположных фазах



ВОПРОСЫ:

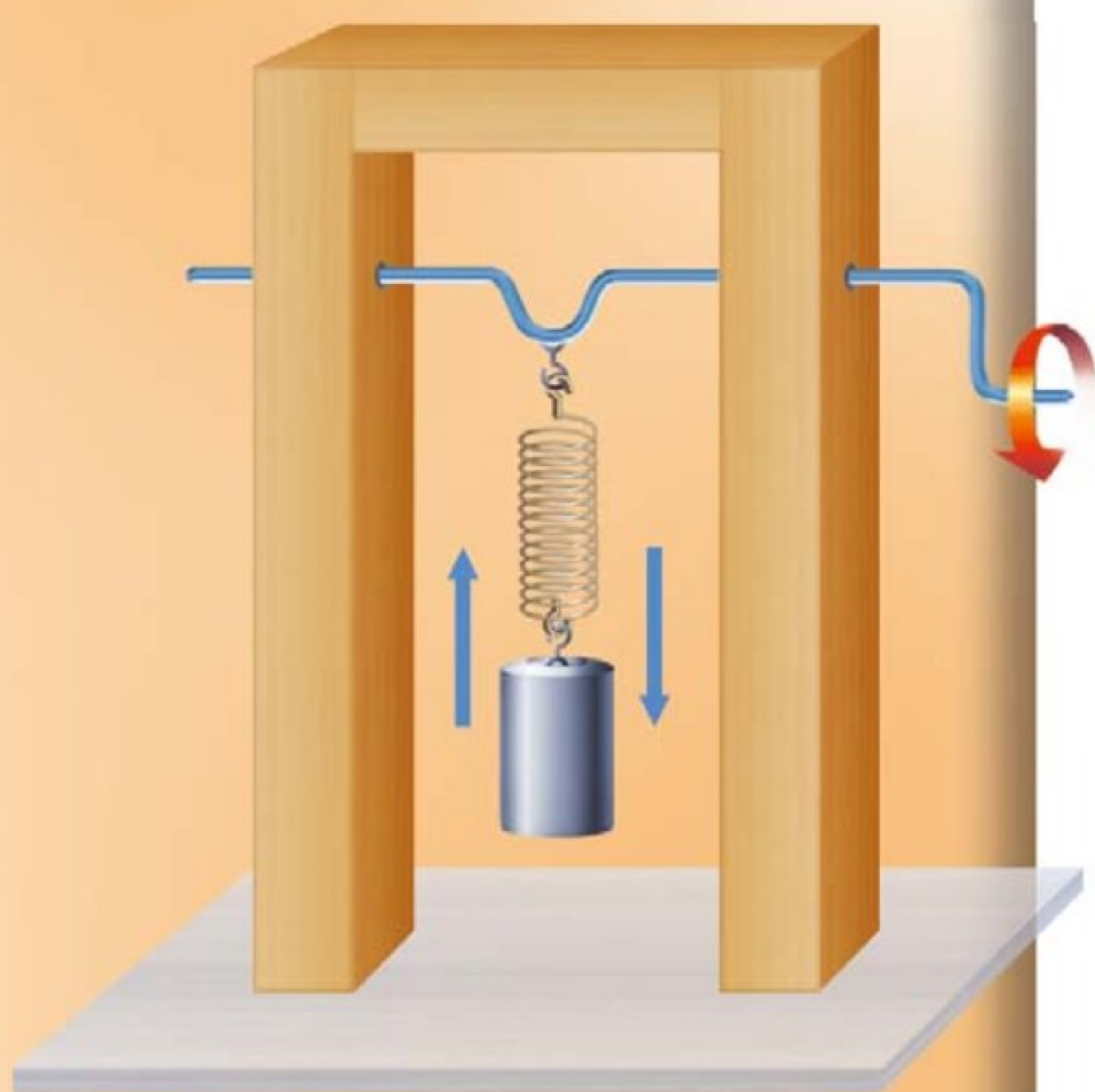
- Как зависит от времени отклонение груза маятника от положения равновесия при гармонических колебаниях?
- Как изменится собственная частота колебаний пружинного маятника, если жёсткость пружины уменьшить в два раза?
- Два одинаковых математических маятника колеблются в одной фазе. Чему равна относительная скорость грузиков маятника?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Чем вынужденные колебания отличаются от колебаний свободных.
- Что такое вынуждающая сила и какова её роль.
- Чем определяется частота вынужденных колебаний.
- Что такое резонанс и при каких условиях он возникает.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие колебания называют свободными?
- От чего зависят период и частота колебаний маятника?
- Какие превращения энергии происходят при свободных колебаниях?
- Что такое затухающие колебания?
- Какие силы называют внутренними и внешними?



ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

Независимо от характера колебательной системы свободные колебания в реальных условиях всегда являются затухающими, поэтому для того чтобы колебания не прекращались, на колебательную систему должно оказываться внешнее воздействие.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ Поскольку колебания затухают вследствие потерь механической энергии из-за действия сил трения, то эти потери необходимо восполнять за каждый период колебаний. Это можно сделать, если воздействовать на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, если в нужные моменты времени подталкивать грузик маятника рукой, он может качаться с неизменной амплитудой сколь угодно долго. Аналогичным образом обычно раскачивают качели — их подталкивают в такт колебаниям.

Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют **вынужденными**, при этом внешнюю периодически изменяющуюся силу называют **вынуждающей силой**. Так как потери энергии в процессе вынужденных колебаний компенсируются поступлением энергии от источника внешней силы, то эти колебания являются **незатухающими**.

Наблюдать вынужденные колебания удобно с помощью устройства, состоящего из груза, подвешенного на пружине, верхний конец которой прикреплен к оси, изогнутой в виде колена. При вращении рукоятки на пружину со стороны оси будет действовать внешняя сила, в результате чего груз начнет постепенно раскачиваться. И хотя у пружинного маятника есть своя собственная частота колебаний, зависящая от массы груза и жесткости пружины, данный опыт показывает, что частота установившихся колебаний оказывается равной частоте, с которой вращается рукоятка.

Таким образом, **вынужденные колебания совершаются с частотой, равной частоте изменения вынуждающей силы**. В этом заключается принципиальное отличие вынужденных колебаний от колебаний свободных. Амплитуда вынужденных колебаний при данной частоте вынуждающей силы не будет изменяться, хотя на колебательную систему по-прежнему действуют силы трения. Это означает, что потери энергии из-за трения полностью компенсируются за счёт работы вынуждающей силы.

РЕЗОНАНС Большой практический интерес представляет вопрос о том, как амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения между частотой вынуждающей силы и собственной частотой колебательной системы. Для выяснения этой зависимости воспользуемся двумя нитяными маятниками, подвешенными к общей перекладине.

При этом длина маятника **1** постоянна, а длину более массивного маятника **2** можно изменять, подтягивая или опуская свободный конец нити. Изменяя длину нити маятника, мы тем самым будем изменять и его собственную частоту колебаний.

Если возбудить колебания маятника **2**, то он через перекладину будет действовать на маятник **1** с некоторой вынуждающей силой, частота которой равна частоте колебаний маятника **2**. При уменьшении длины маятника **2** наблюдается увеличение частоты его колебаний, и, следовательно, увеличивается и частота вынуждающей силы, действующей на маятник **1**.

По мере приближения длины маятника **2** к длине маятника **1** амплитуда колебаний маятника **1** возрастает и достигает своего наибольшего значения при равенстве длин маятников. Это означает, что амплитуда вынужденных колебаний маятника **1** будет максимальной при совпадении частоты ν вынуждающей силы с собственной частотой ν_0 маятника **1**. При дальнейшем уменьшении длины маятника **2** частота его колебаний станет больше собственной частоты колебаний маятника **1**, и амплитуда колебаний последнего уменьшится.

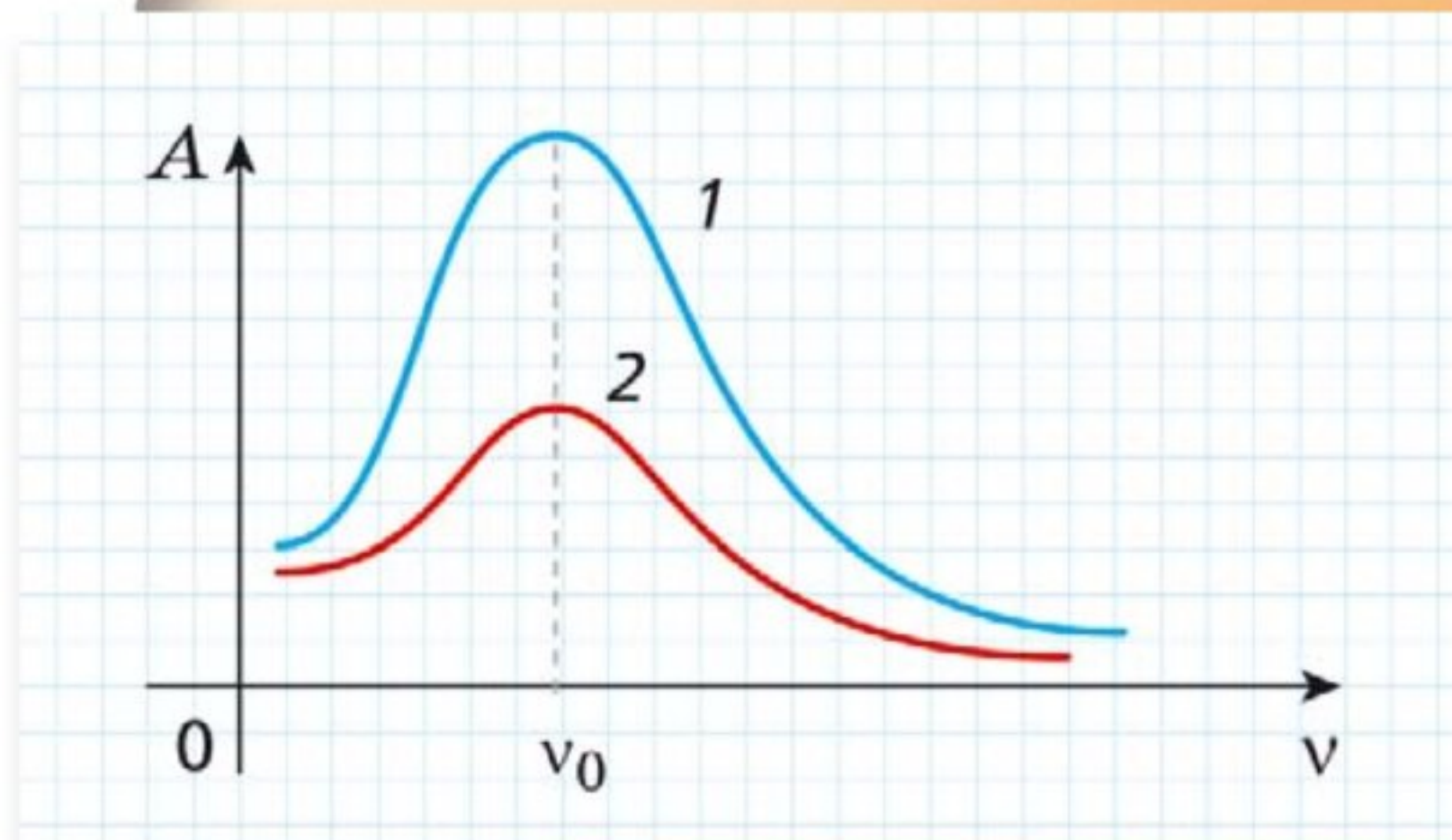
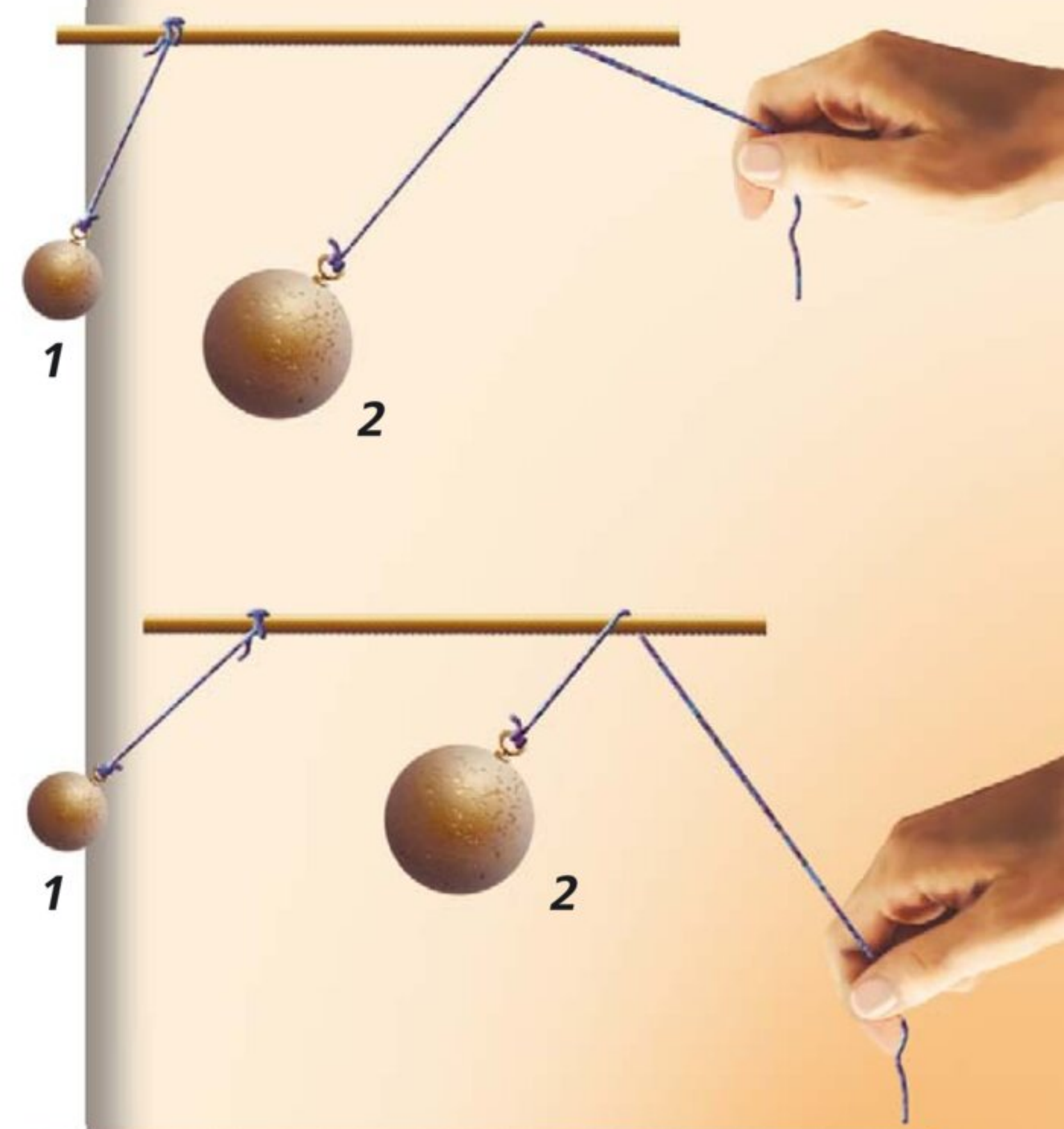
Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называют **резонансом**.

Качественная зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы приведена на рисунке. На этом рисунке изображены две резонансные кривые для одной и той же колебательной системы, но для разных значений силы трения, действующей на систему. Кривая **1** соответствует малой силе трения, и поэтому резонансный максимум выражен резко. Кривая **2** соответствует большой силе трения, в результате чего резонанс проявляется слабо.

При резонансе создаются наиболее благоприятные условия для передачи энергии колебательной системе за счёт работы вынуждающей силы. Чем меньше сила трения, тем больше амплитуда установившихся колебаний.

ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА При работе различных механизмов могут возникать периодические воздействия на сам механизм, обусловленные, например, наличием движущихся поршней, неточной центровкой вращающихся валов и т. п. Если частота периодических воздействий совпадёт с собственной частотой колебательной системы, то возникает резонанс и возможно разрушение механизма.

Вместе с тем явление резонанса используется и в практических целях. Например, на этом явлении основана работа частотомера — прибора для измерения частоты периодических процессов. Особо важную роль резонанс играет в процессах генерации, передачи и приёма электромагнитных волн.



ВОПРОСЫ:

- Что такое вынужденные колебания и при каких условиях они возникают?
- Чем определяется частота вынужденных колебаний?
- В чём заключается явление резонанса?
- Приводит ли наличие силы трения к затуханию вынужденных колебаний?
- Как силы трения влияют на резонанс?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление периода и частоты нитяного маятника.
- Как решать задачи на превращение энергии при колебаниях.
- Как по уравнениям гармонических колебаний находить амплитуду, период, частоту и фазу колебаний.



ЗАДАЧА 1 Подвешенное на длинной верёвке цилиндрическое ведёрко, доверху наполненное водой, совершает малые гармонические колебания. В центре доньшка ведёрка имеется отверстие, через которое постепенно вытекает вода. Как с течением времени будет изменяться период колебаний ведёрка? Трением и затуханием колебаний пренебречь.

Решение:

В отличие от периода колебаний математического маятника, период колебаний ведёрка зависит не просто от длины верёвки, а от расстояния от точки подвеса до положения центра масс ведёрка. По мере вытекания воды центр масс ведёрка сначала будет понижаться, затем достигнет своего нижайшего положения, при котором в ведёрке ещё будет некоторое количество воды, а когда вода полностью вытечет — центр масс вновь займёт своё первоначальное положение (в центре ведёрка). Следовательно, по мере вытекания воды период колебаний сначала будет увеличиваться, затем достигнет своего наибольшего значения, после чего начнёт уменьшаться и достигнет своего первоначального значения к моменту, когда ведёрко станет пустым.

Ответ: период колебаний сначала будет увеличиваться, затем достигнет своего наибольшего значения, после чего начнёт уменьшаться и достигнет своего первоначального значения к моменту, когда ведёрко станет пустым.

ЗАДАЧА 2 Нитяной маятник за 20 с совершает 16 колебаний. Определите период и частоту колебаний, а также длину нити маятника.

Дано:
 $t = 20 \text{ с}$
 $N = 16$

$T = ?$
 $\nu = ?$
 $l = ?$

Решение:

Период колебаний: $T = \frac{t}{N} = \frac{20 \text{ с}}{16} = 1,25 \text{ с}.$

Частота колебаний обратна периоду:

$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,25 \text{ с}} = 0,8 \text{ Гц}.$

Длину нити находим из формулы периода колебаний для математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \rightarrow l = \frac{T^2 g}{4\pi^2} = \frac{(1,25 \text{ с})^2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}{4 \cdot 3,14^2} \approx 0,39 \text{ м} = 39 \text{ см}.$$

Ответ: $T = 1,25 \text{ с}$; $\nu = 0,8 \text{ Гц}$; $l = 39 \text{ см}.$

ЗАДАЧА 3 Гирька, подвешенная на пружине, растягивает её на 5 см. Гирьку оттянули вниз и отпустили. Найдите амплитуду колебаний гирьки, если максимальная скорость её движения составляет 2 м/с.

Поскольку амплитуда колебаний отсчитывается от положения равновесия гирьки, то изменение его потенциальной энергии в поле тяжести учитывать не нужно.

Дано:

$$x = 5 \text{ см}$$

$$v_{\text{max}} = 2 \text{ м/с}$$

А — ?

СИ

$$0,05 \text{ м}$$

Решение:

На гирьку, подвешенную на пружине, действуют сила тяжести и сила упругости. Запишем условие равновесия гирьки:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = 0,$$

или в проекциях на ось OY : $-mg + F_{\text{упр}} = 0$.

$$F_{\text{упр}} = kx, \text{ поэтому можно записать } -mg + kx = 0.$$

Откуда жёсткость пружины $k = \frac{mg}{x}$.

Скорость имеет максимальное значение, когда гирька проходит положение равновесия. В этот момент она обладает максимальной кинетической энергией:

$$E_{\text{кmax}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

В момент максимального отклонения от положения равновесия гирька обладает максимальной потенциальной энергией

$$E_{\text{пmax}} = \frac{kA^2}{2}.$$

По закону сохранения энергии $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kA^2}{2}$.

Откуда $A = \sqrt{\frac{m}{k}} v_{\text{max}}$. Учитывая, что $k = \frac{mg}{x}$, получим

$$A = \sqrt{\frac{x}{g}} v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{0,05 \text{ м}}{9,8 \text{ м/с}^2}} \cdot 2 \text{ м/с} \approx 0,14 \text{ м} = 14 \text{ см}.$$

Ответ: $A = 14 \text{ см}$.

ЗАДАЧА 4 Математический маятник совершает колебания по гармоническому закону $x = 0,1 \sin\left(\frac{4}{3}\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Определите период, частоту, амплитуду, циклическую частоту и начальную фазу колебаний. Все величины заданы в единицах СИ. Решение поясните с помощью графика.

Дано:

$$x = 0,1 \sin\left(\frac{4}{3}\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$$

T — ?

v — ?

A — ?

 ω_0 — ? φ_0 — ?

Решение:

Уравнение гармонических колебаний можно записать в общем виде:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где A — амплитуда колебаний;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ — циклическая частота; φ_0 — начальная фаза колебаний. Из исходного уравнения

имеем:

$$x = 0,1 \sin\left(\frac{4\pi}{3}t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$A = 0,1 \text{ м}; \quad \omega_0 = \frac{4\pi}{3} \text{ рад/с}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{4\pi/3} = 1,5 \text{ с};$$

$$\nu = \frac{1}{T} = 0,67 \text{ Гц}; \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2}.$$

Ответ: $T = 1,5 \text{ с}$; $\nu = 0,67 \text{ Гц}$; $A = 0,1 \text{ м}$; $\omega_0 = \frac{4\pi}{3} \text{ рад/с}$; $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$.

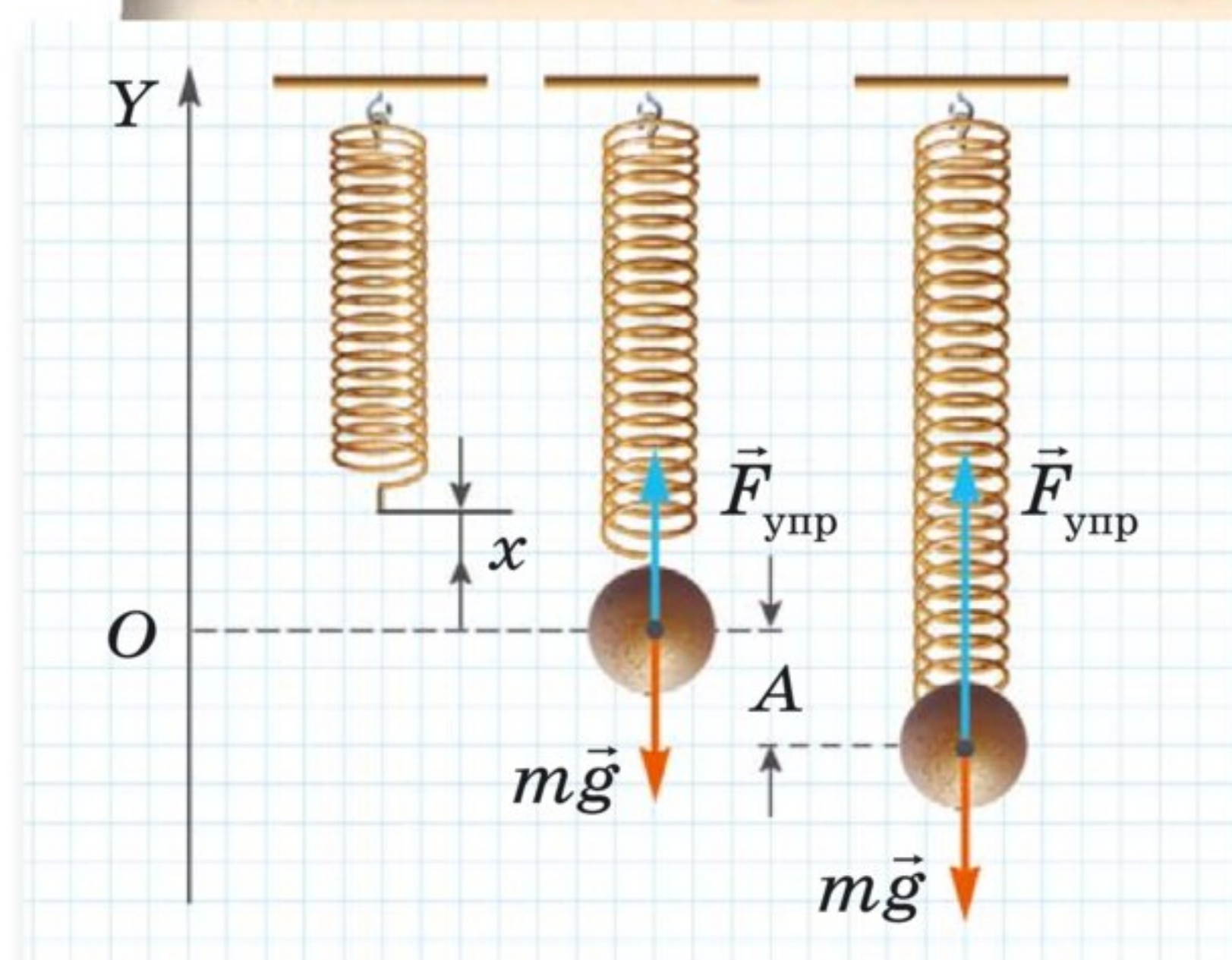
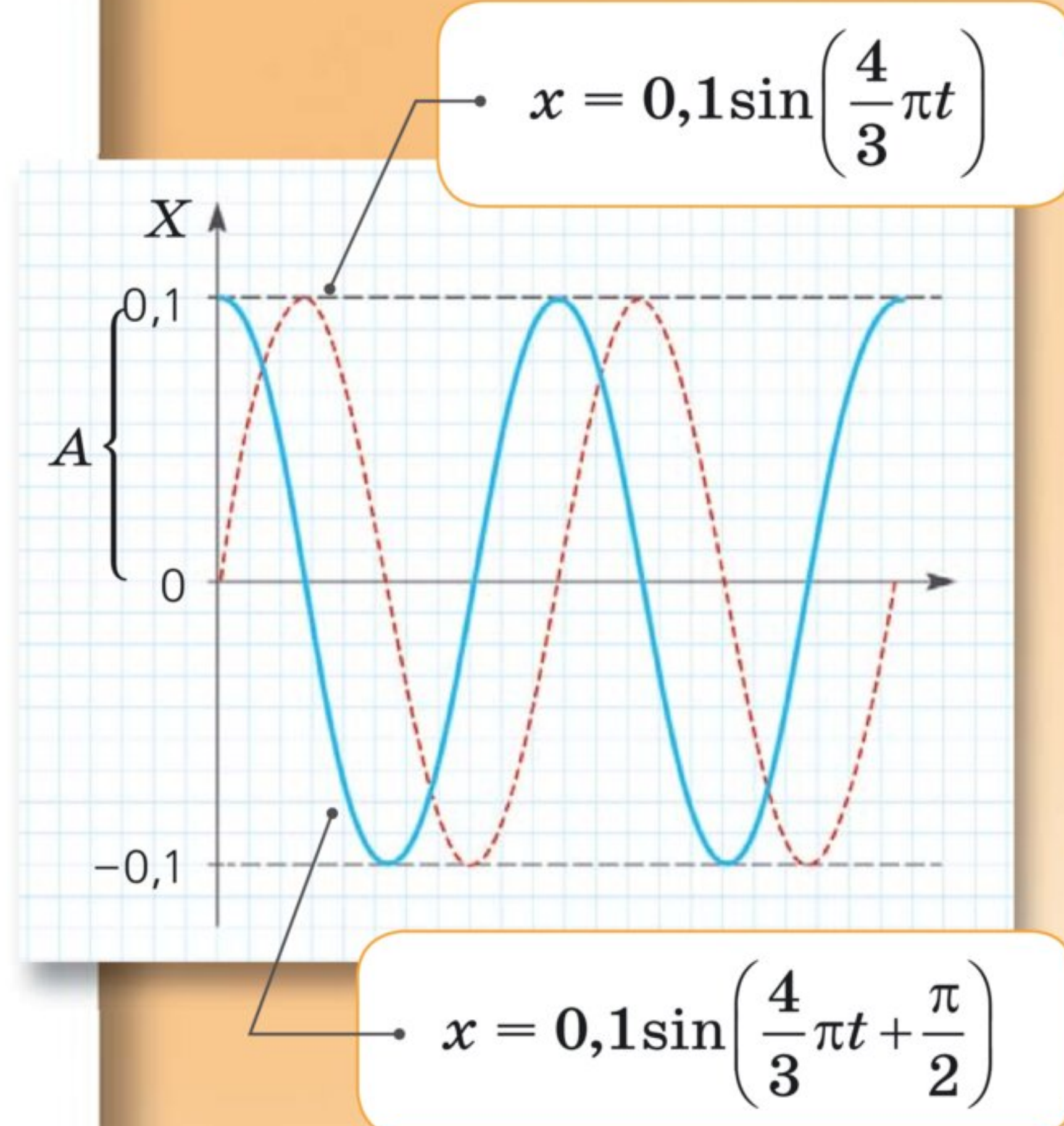


График колебания

$$0,1 \sin\left(\frac{4}{3}\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$$

сдвинут на $\frac{\pi}{2}$ по отношению к гра-

фику $0,1 \sin\left(\frac{4}{3}\pi t\right)$.



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

$$E = \frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК

$$E = \frac{kA^2}{2} - \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

РЕШЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

ФАЗА

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$$

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

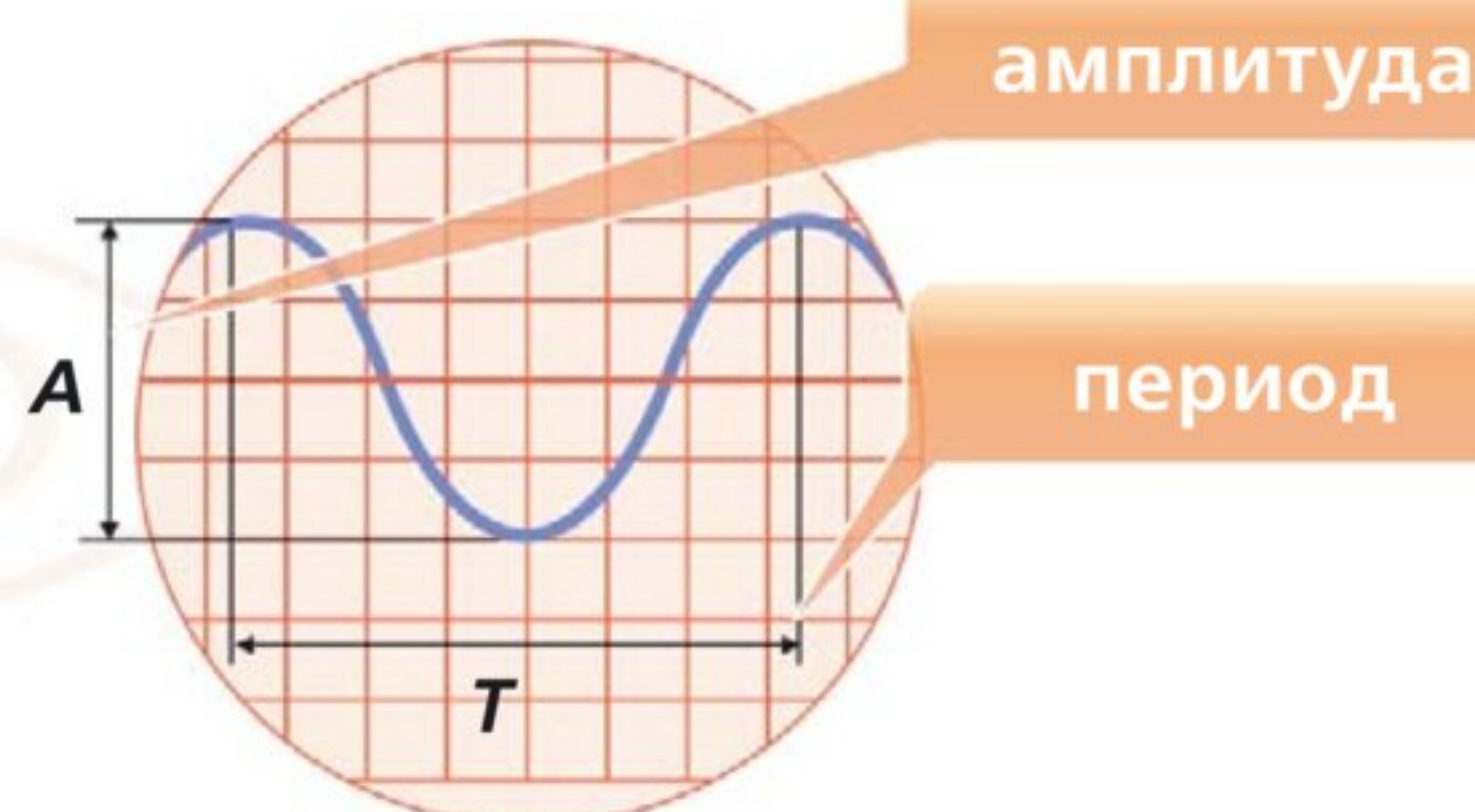
Журнал «Наука и техника»
<http://gotourl.ru/13736>

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Системы тел, которые способны совершать колебания, называют колебательными системами.
- Колебания, происходящие только за счёт первоначального запаса энергии системы, называются свободными колебаниями.
- Колебания таких систем, как нитяной и пружинный маятник, являются гармоническими.
- Гармонические колебания характеризуются периодом, частотой и амплитудой колебаний, а также циклической частотой и фазой.
- В отсутствие сил трения механическая энергия колебательной системы сохраняется.
- Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют вынужденными колебаниями.
- Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называют резонансом.



ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ



ПОДРОБНЕЕ...

Большая книга знаний для школьников от А до Я. Человек. Природа. Наука. Техника (Oxford Illustrated Science Encyclopedia). — М.: Эксмо, 2011.

Суорц К.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 1. / К. Э. Суорц. — М.: Наука, 1986.

Тит Том. Научные забавы: интересные опыты, самоделки, развлечения. / Том Тит. — М.: ИД Мещерякова, 2010.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Шарик, подвешенный на пружине, совершает гармонические колебания. Сохранится ли характер колебаний, если вся система начнёт свободно падать?
- Имеются два нитяных маятника разной длины. Период колебаний одного из них известен. Как, не располагая секундомером и линейкой, определить период колебаний другого маятника?
- Вода, которую несут в вёдрах на коромысле, начинает сильно расплёскиваться. Можно ли, не останавливаясь, прекратить расплёскивание?
- Почему в квартире иногда начинают дрожать стёкла, если на улице проезжает тяжёлый грузовик?

Глава 3

ЭЛЕКТРО- МАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
- ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК
- УРАВНЕНИЕ СВОБОДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ. ФОРМУЛА ТОМСОНА
- МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ
- ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
- ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ТРАНСФОРМАТОР
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ II



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Изучать ток, быстро меняющий направление, очень интересно. Почти каждый опыт приводит к новому открытию. Многие результаты, конечно, можно предсказать, но очень многие непредсказуемы.

Н. Тесла

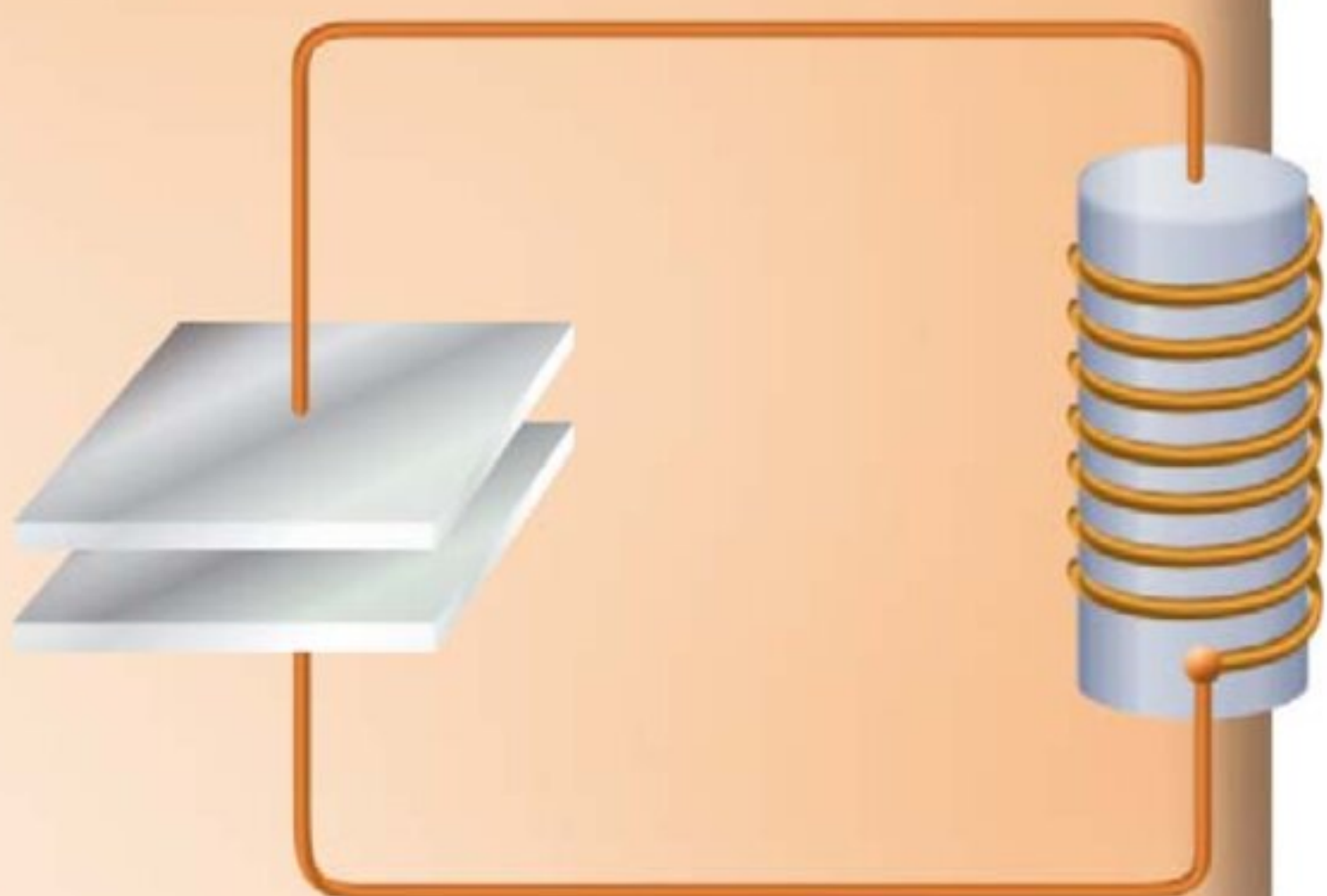
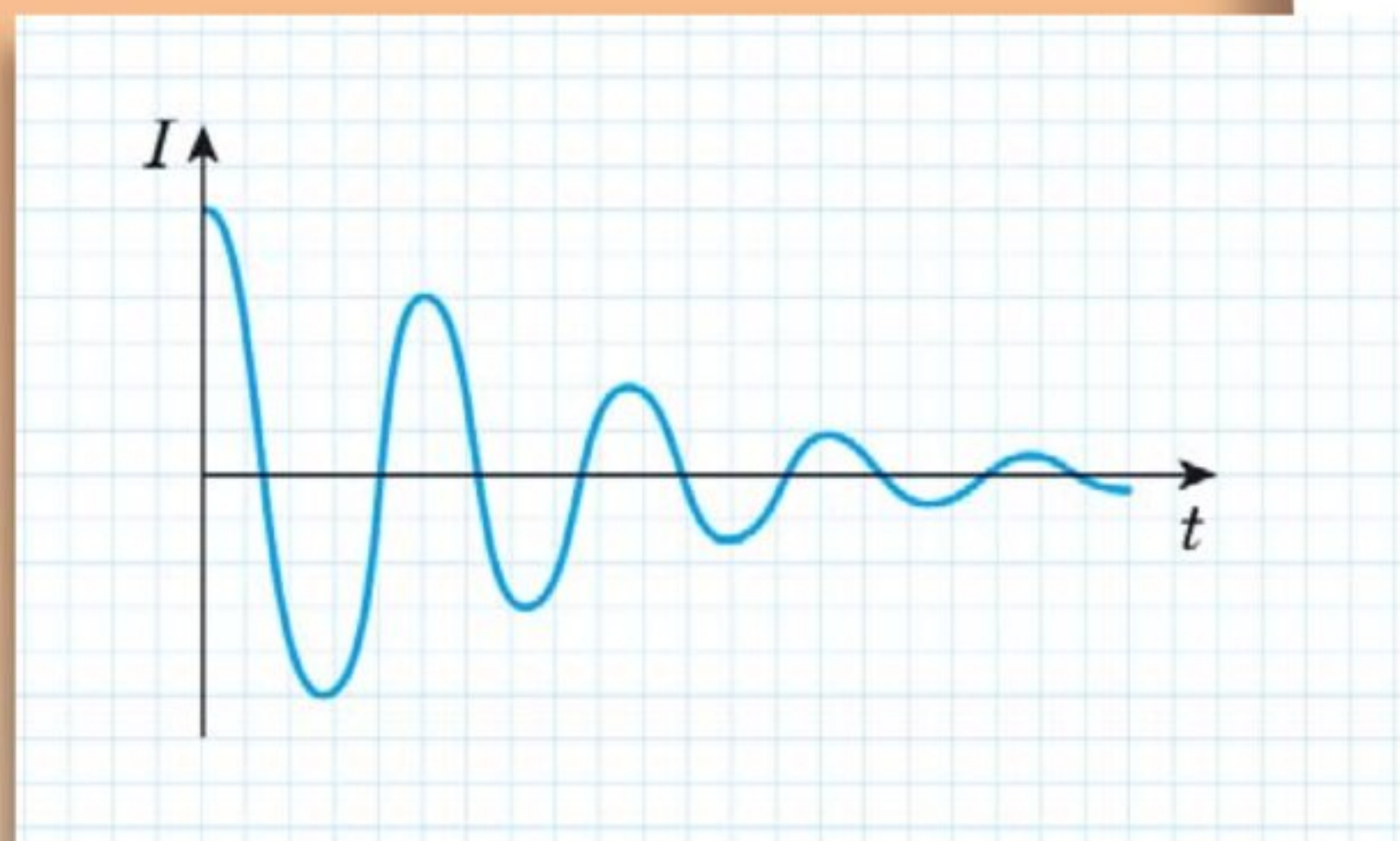
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электромагнитные колебания.
- Какие электромагнитные колебания называют свободными.
- Что такое колебательный контур и из каких элементов он состоит.
- Почему свободные электромагнитные колебания являются затухающими.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое конденсатор?
- Что такое катушка индуктивности?
- В чём заключается явление самоиндукции?
- Какое электрическое поле называют вихревым?

Впервые разряд лейденской банки на катушку наблюдал французский физик Ф. Савар. Однако он не смог объяснить случайный характер намагничивания концов железного сердечника, вставленного в катушку.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В череде открытий в физике особую роль сыграли опыты по изучению разряда лейденской банки, к обкладкам которой подключалась проволоочная катушка, содержащая много витков. Лейденская банка заряжалась от электростатической машины и по праву могла считаться первым в истории физики конденсатором.

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Впервые целенаправленные опыты по исследованию магнитного действия тока с использованием катушек проводил Ампер. При этом было обнаружено, что при разряде лейденской банки вставленная в катушку стальная спица намагничивается. Эти опыты, как и опыт Эрстеда по воздействию тока на магнитную стрелку, подтверждали магнитное действие тока. Необычным в этих опытах было то обстоятельство, что намагничивание спицы происходило иногда в одном направлении, иногда в противоположном, хотя знак заряда каждого контакта банки был всегда один и тот же. Другими словами, нельзя было заранее предсказать, какой конец спицы окажется северным полюсом, а какой — южным. Это можно объяснить только колебательным характером разряда: за время разряда банка успевала много раз перезарядиться, и ток многократно менял своё направление. При этом спица сохраняла то намагничивание, которое соответствовало последнему направлению разрядного тока в катушке.

Таким образом, происходящие по тому или иному закону изменения в электрической цепи заряда, силы тока и напряжения являются **электромагнитными колебаниями**. Если колебания возникли, например, в результате сообщения конденсатору некоторого первоначального заряда, то такие колебания называют **свободными**.

Обычно электромагнитные колебания в цепи затухают за малые доли секунды, и наблюдать их непосредственно невозможно, поскольку мы не можем видеть ни перезарядки конденсатора, ни колебаний силы тока в катушке. Поэтому для изучения подобных быстропеременных процессов используют специальные устройства — электронные осциллографы. Движение электронного луча осциллографа по экрану позволяет наблюдать временную развёртку исследуемого колебания.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Электрическую цепь, состоящую из конденсатора и присоединённой к его обкладкам катушки, называют **колебательным контуром**. Такая цепь наиболее удобна для изучения свободных электромагнитных колебаний.

Рассмотрим причины возникновения колебаний в контуре. Сообщим конденсатору в начальный момент времени

$t = 0$ электрический заряд. В результате между обкладками конденсатора появится электрическое поле, обладающее некоторым запасом энергии. Под действием электрического поля заряды начинают двигаться по виткам катушки, создавая в цепи ток.

Появление тока приводит к возникновению в катушке магнитного поля, энергия которого увеличивается по мере возрастания силы тока. При этом энергия электрического поля конденсатора убывает, поскольку при разрядке конденсатора заряд на его обкладках уменьшается.

Изменяющееся магнитное поле порождает в витках катушки вихревое электрическое поле, которое при нарастании магнитного поля направлено против тока и препятствует его быстрому увеличению.

В момент $t = T/4$, соответствующий четверти периода колебаний, конденсатор полностью разряжается, а ток достигает максимального значения. Вся энергия колебательного контура оказывается сосредоточенной в магнитном поле катушки.

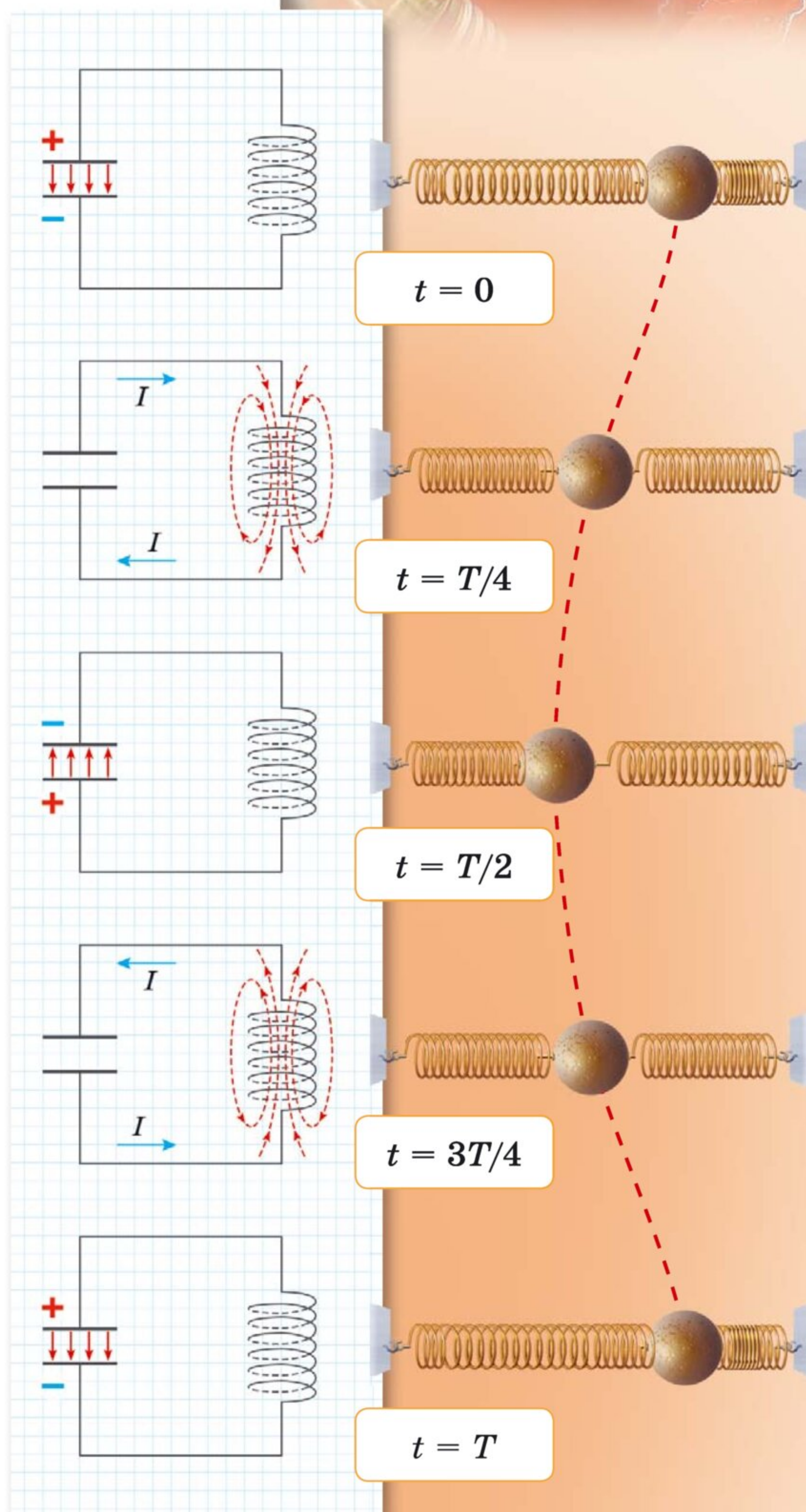
Хотя в этот момент электрическое поле в конденсаторе отсутствует, электрический ток не может прекратиться сразу. Мгновенному убыванию тока препятствует явление самоиндукции, возникающее вследствие ослабления магнитного поля. В этом случае вихревое электрическое поле будет направлено уже по току, способствуя перезарядке конденсатора.

В результате к моменту $t = T/2$ конденсатор полностью перезарядится, и сила тока станет равной нулю.

Далее явление повторяется в обратном порядке: конденсатор начнёт разряжаться, энергия электрического поля будет преобразовываться в энергию магнитного поля, и к моменту $t = 3T/4$ конденсатор вновь полностью разрядится, а энергия магнитного поля достигнет максимального значения.

Спустя ещё четверть периода, т.е. к моменту $t = T$, система возвратится в своё первоначальное состояние: заряд конденсатора максимален, ток в контуре отсутствует.

Таким образом, в колебательном контуре возникает переменный ток, и если бы не было потерь энергии, то колебания были бы незатухающими. В реальном контуре потери энергии неизбежны, поскольку катушка и соединительные провода обладают сопротивлением, что способствует превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводников.



ВОПРОСЫ:

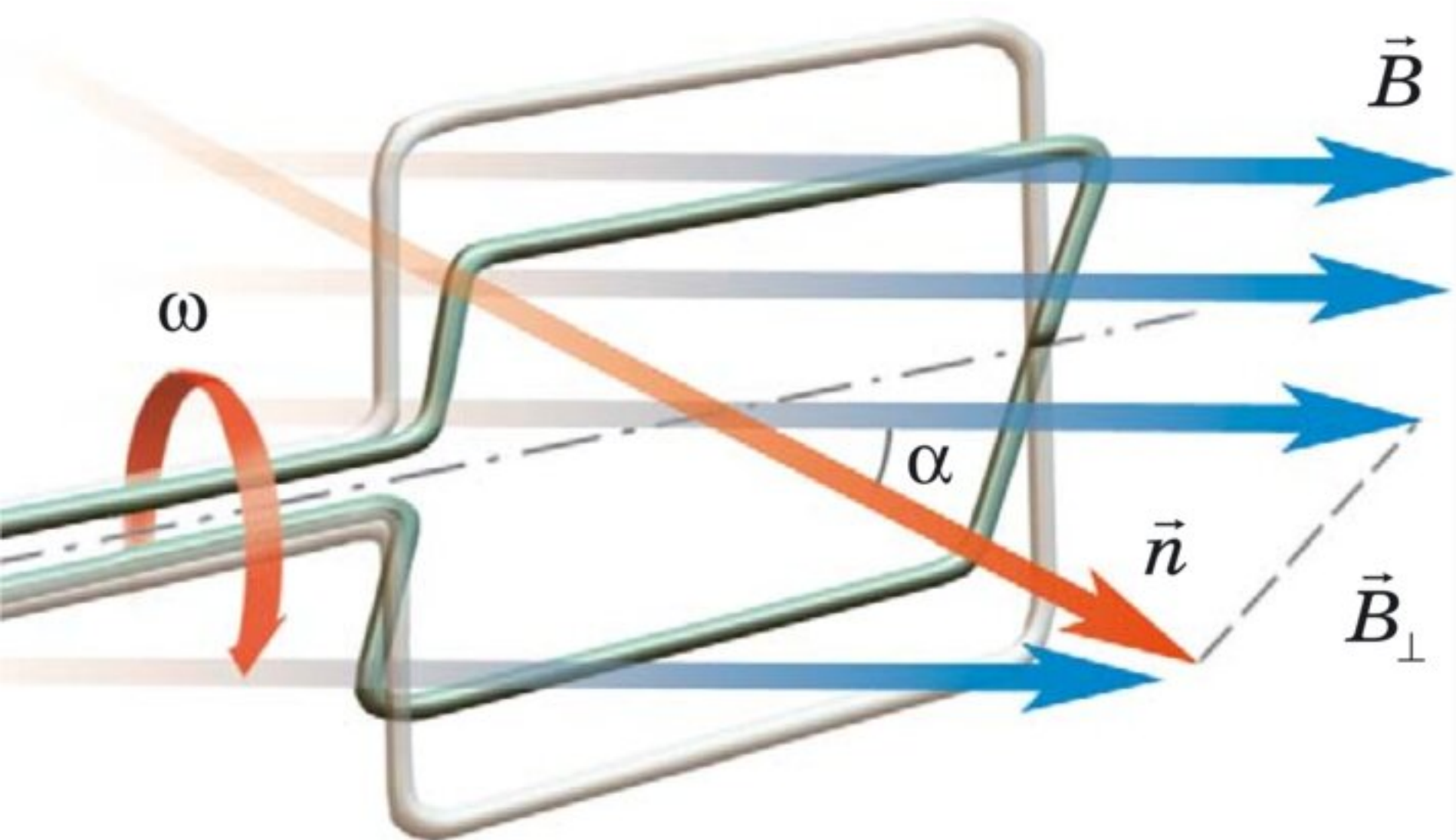
- Почему в тот момент, когда электрическое поле конденсатора полностью исчезает, заряды продолжают двигаться по цепи?
- В чём заключается отличие электрического поля конденсатора от вихревого электрического поля?
- Могут ли свободные электромагнитные колебания существовать длительное время в реальном колебательном контуре?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- При каких условиях в проводящем контуре возникает ЭДС, изменяющаяся со временем по гармоническому закону.
- Что такое переменный ток.
- Что такое генератор переменного тока.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое магнитный поток?
- В чём заключается явление электромагнитной индукции?
- Как формулируется закон электромагнитной индукции?



ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

В реальных условиях свободные электромагнитные колебания затухают очень быстро. Для получения незатухающих колебаний, которые по своей сути являются вынужденными, используются генераторы, в которых возбуждается периодически изменяющаяся ЭДС.

ВРАЩЕНИЕ РАМКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ Принцип работы такого генератора можно понять, рассмотрев вращение проводящей рамки в магнитном поле.

Установим плоскость рамки перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. Очевидно, в этом положении рамку пронизывает максимальный магнитный поток. При повороте рамки на некоторый угол α единичный вектор $\vec{n}$, перпендикулярный плоскости рамки, также повернётся на этот угол относительно линий магнитной индукции. В этом положении магнитный поток Φ через контур, ограниченный рамкой, будет определяться составляющей $\vec{B}_\perp$ вектора индукции, перпендикулярной плоскости рамки: $B_\perp = B \cos \alpha$.

Если рамка вращается с угловой скоростью ω , то угол α с течением времени изменяется по закону

$$\alpha = \omega t = \frac{2\pi}{T}t,$$

где T — период вращения рамки. Поэтому зависимость магнитного потока Φ от времени записывается в виде:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t. \quad (1)$$

Согласно закону электромагнитной индукции при изменении магнитного потока в рамке возбуждается ЭДС индукции:

$$e_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'. \quad (2)$$

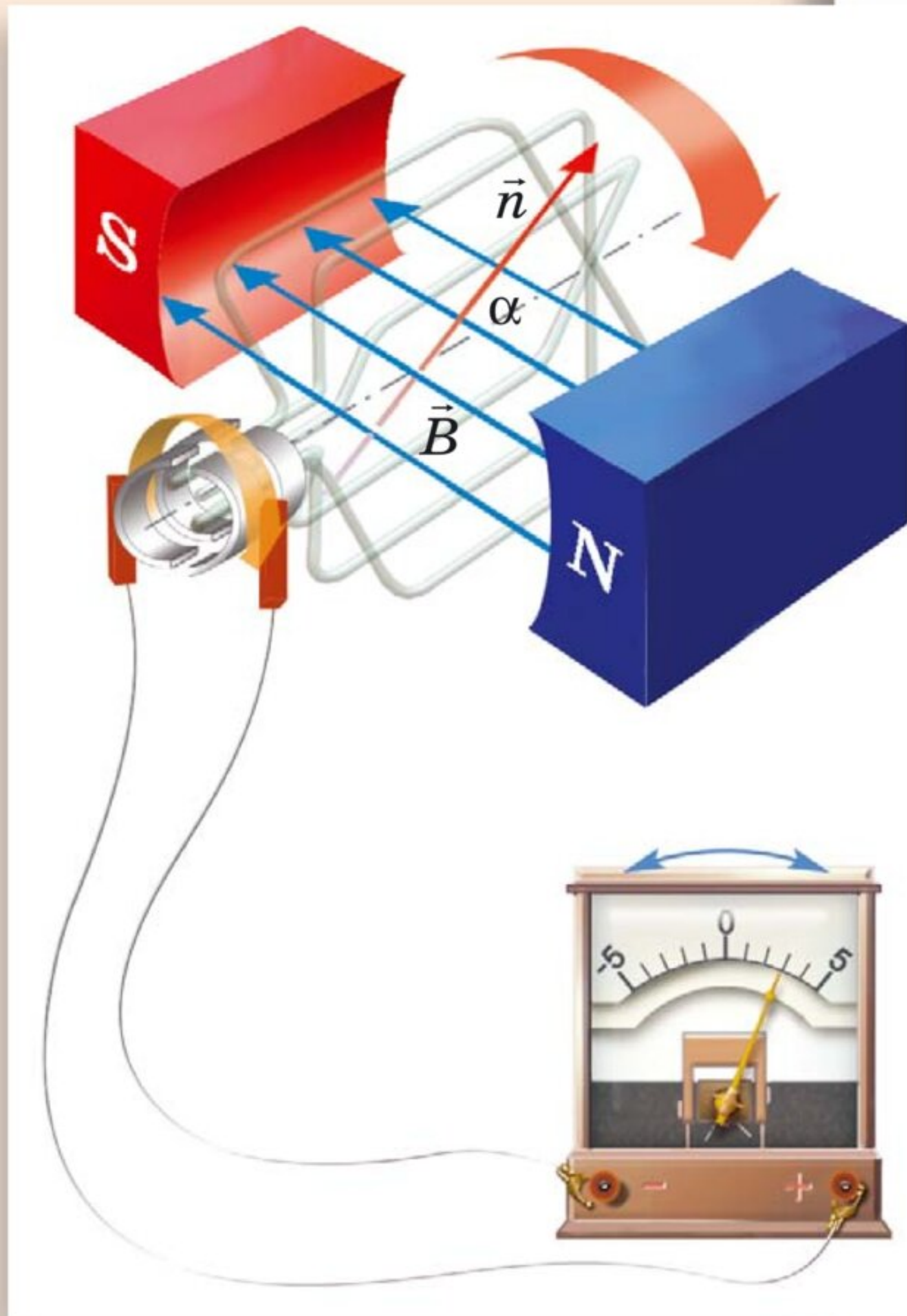
Вычислив производную по времени от магнитного потока (1), получим

$$e_i = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin \omega t, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС.

Если к выводам рамки с помощью двух изолированных друг от друга колец и скользящих по ним щёток подключить миллиамперметр, то в образовавшейся электрической цепи возникнут вынужденные гармонические колебания силы тока. Такой ток называется **переменным током**.

Действительно, как показывает опыт, при быстром повороте рамки из начального положения на 180° стрелка прибора отклоняется на несколько делений, а при



дальнейшем повороте рамки в том же направлении ещё на 180° стрелка отклоняется в противоположную сторону на такое же число делений. Направление тока меняется при каждом повороте рамки на 180° от её начального положения.

Согласно показаниям миллиамперметра, при этом меняется и сила тока от нулевого значения в начальный момент, когда плоскость рамки перпендикулярна линиям магнитной индукции, до некоторого максимального в тот момент времени, когда рамка повернётся на 90° от её начального положения. За это время магнитный поток Φ меняется от максимального значения до нулевого.

В опытах, аналогичных рассмотренному, возникающая ЭДС, как правило, не превышает нескольких милливольт. Поскольку амплитуда силы тока в цепи зависит от амплитуды ЭДС, то для получения больших значений ЭДС используют специальные устройства — генераторы переменного тока.

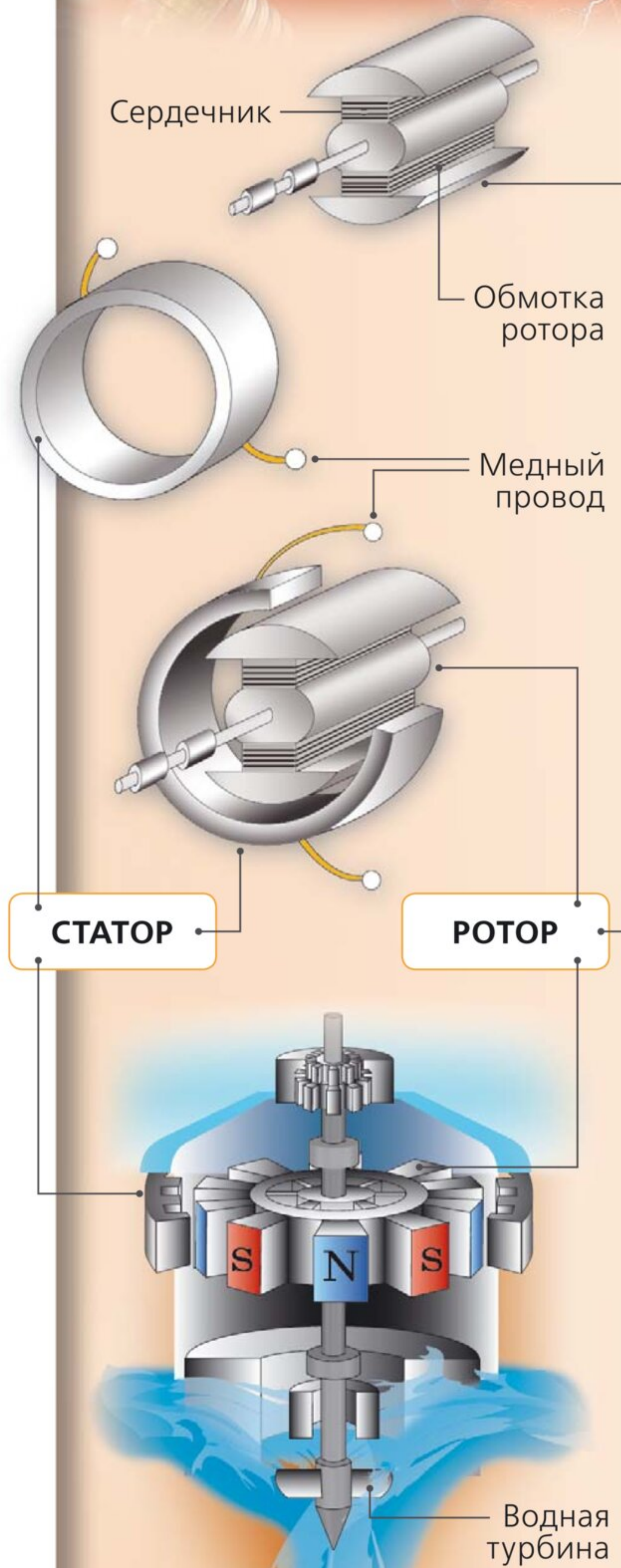
ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В настоящее время переменный ток получают в основном с помощью электро-механических индукционных генераторов, преобразующих механическую энергию в электрическую. При этом в генераторах вращаются не рамки, объединённые в обмотку, в которой индуцируется переменная ЭДС, а электромагнит. В первую очередь это связано с тем обстоятельством, что при больших частотах вращения обмотки скользящие по кольцам щётки быстро выходят из строя. Вращающаяся часть генератора называется ротором и является источником магнитного поля.

Ротор располагается внутри массивной стальной станины цилиндрической формы, называемой статором. Во внутренней части статора имеются специальные пазы, в которые укладывается медный провод в виде витков. При вращении ротора в этих витках индуцируется переменная ЭДС.

Магнитное поле ротора порождается постоянным электрическим током, протекающим в обмотке, навитой на стальной сердечник ротора. Это поле вращается вместе с ротором. Сам ротор генератора вращается при помощи какого-либо двигателя — гидротурбины, двигателя внутреннего сгорания и т. п.

Частота переменного тока — это число колебаний за 1 с. Стандартная частота переменного тока, используемого в электрических сетях России и странах Европы, равна 50 Гц. Это означает, что через каждые 0,01 с, т. е. через каждую половину периода, направление тока меняется на противоположное.

Поскольку скорость вращения гидротурбины мала, роторы современных гидрогенераторов имеют несколько пар полюсов. Применение многополюсных генераторов позволяет в нужных пределах варьировать частоту переменного тока.



ВОПРОСЫ:

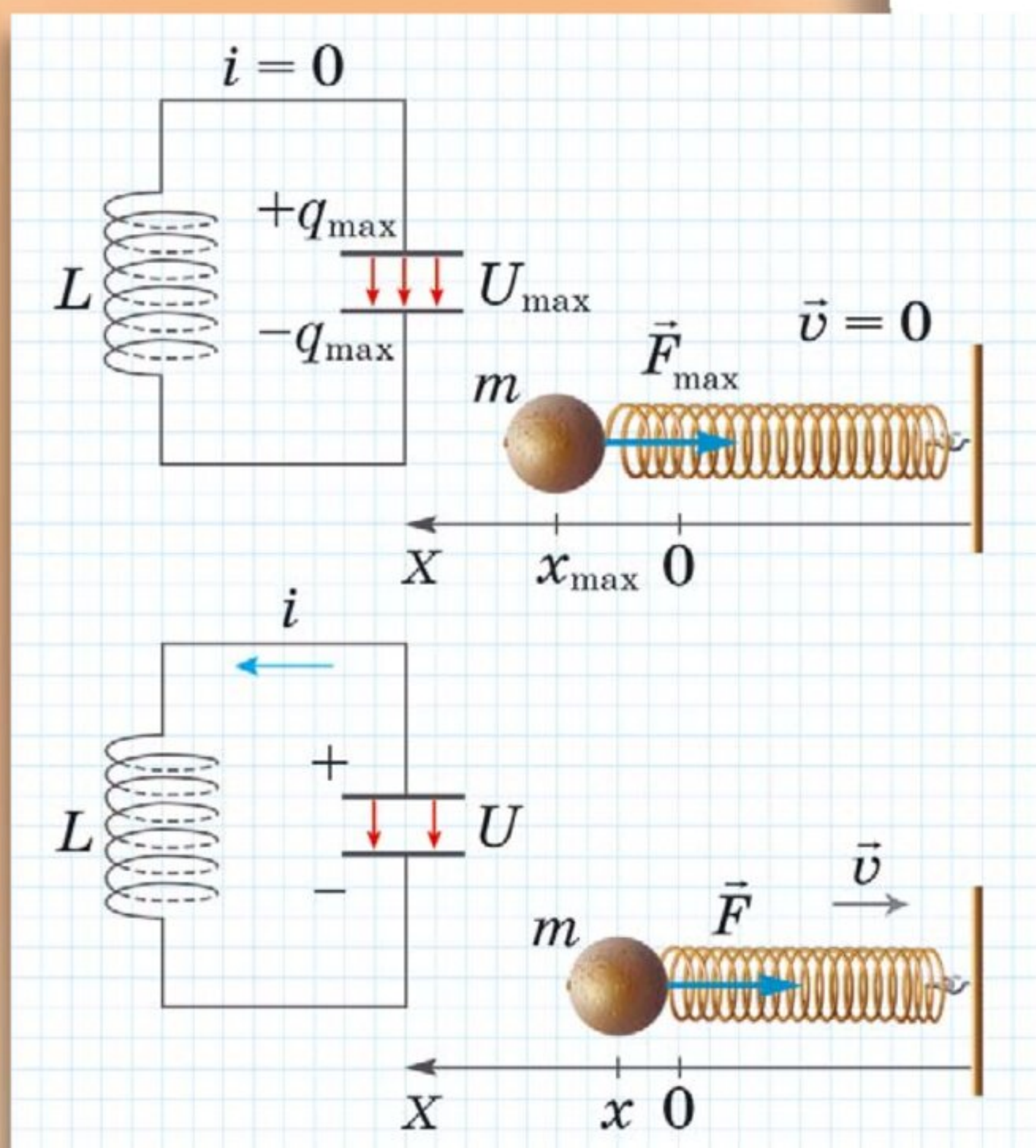
- В чём заключается отличие вынужденных электромагнитных колебаний от свободных?
- От каких физических величин зависит амплитуда переменной ЭДС?
- Как взаимосвязаны изменение магнитного потока и изменение ЭДС во вращающемся контуре?
- Каким образом регулируется частота переменного тока, вырабатываемого с помощью гидрогенераторов?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключается аналогия между механическими и электрическими величинами при описании колебаний.
- Как записывается уравнение свободных гармонических колебаний заряда.
- Как записывается решение уравнения свободных гармонических колебаний.
- От каких характеристик контура зависит период свободных гармонических колебаний.

ВСПОМНИТЕ:

- Как записывается уравнение движения пружинного маятника?
- Что такое собственная частота колебаний?
- Что такое идеальный колебательный контур и из каких частей он состоит?



Если обозначить величины: ёмкость конденсатора — C , индуктивность катушки — L , то период свободных гармонических колебаний в контуре можно рассчитать по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

УРАВНЕНИЕ СВОБОДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ. ФОРМУЛА ТОМСОНА

Гармонические колебания обладают той замечательной особенностью, что используемые для их описания математические методы совершенно не зависят от физической природы величин, характеризующих колебательный процесс. Это в полной мере относится к описанию и электромагнитных колебаний.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ Анализ свободных механических колебаний грузика на пружине и электромагнитных колебаний в контуре позволяет установить определённое сходство в характерах изменения механических и электрических величин. Например, при механических колебаниях периодические изменения координаты x тела и проекции его скорости v_x обусловлены силой упругости $\vec{F}$, действующей на тело, значение которой пропорционально смещению тела от положения равновесия. При этом коэффициентом пропорциональности является жёсткость пружины k .

В колебательном контуре ток возникает в процессе разрядки конденсатора, причём характер изменения силы тока зависит от характера изменения напряжения между обкладками конденсатора. Напряжение пропорционально заряду конденсатора $U = q/C$, поэтому коэффициентом пропорциональности в этом случае является величина $1/C$, обратная ёмкости.

Таким образом, прослеживается прямая аналогия между силой упругости и напряжением, что свидетельствует о сходном характере изменения этих величин. При этом электрическим аналогом жёсткости пружины является величина, обратная ёмкости конденсатора.

Сходство выражений для потенциальной энергии $kx^2/2$ пружины и энергии $q^2/2C$ электрического поля конденсатора указывает на аналогию между смещением x грузика от положения равновесия и зарядом q конденсатора.

Поскольку производная от координаты представляет собой скорость $x' = v_x$ грузика, а производная от заряда по времени есть не что иное, как сила тока i в данный момент $q' = i$, то указанные величины также являются аналогами. Это особенно отчётливо видно при сопоставлении выражений для кинетической энергии $mv_x^2/2$ грузика и энергии тока $Li^2/2$ в контуре.

Вместе с тем, так же как грузик на пружине вследствие инертности изменяет свою скорость постепенно, сила тока в катушке вследствие явления самоиндукции не может изменяться мгновенно. Это свидетельствует о

том, что индуктивность L , как и масса m в механике, характеризует инертные свойства процессов в колебательном контуре.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАРЯДА В КОНТУРЕ Согласно закону Ома для замкнутой цепи, ЭДС, действующая в контуре, равна сумме напряжений на элементах контура. Источником ЭДС является ЭДС самоиндукции, наводимая в витках катушки:

$$\mathcal{E}_{iL} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -Li',$$

где i' — производная тока по времени. Так как сила тока представляет собой производную заряда по времени $i = q'$, то производная силы тока есть вторая производная заряда по времени: $i' = q''$. Поэтому выражение для ЭДС самоиндукции можно переписать в виде

$$\mathcal{E}_{iL} = -Lq''.$$

Поскольку в идеальном колебательном контуре, не обладающем омическим сопротивлением, падение напряжения на катушке отсутствует, а сумма напряжений на элементах контура есть не что иное, как напряжение на конденсаторе $U = q/C$, то в соответствии с законом Ома

$$-Lq'' = \frac{q}{C}. \quad (1)$$

Уравнение (1) с точностью до обозначений совпадает с полученным ранее уравнением, описывающим колебания грузика на пружине. Если в уравнении (1) заменить q на x , q'' на x'' , $1/C$ на k и L на m , то мы действительно получим уравнение свободных гармонических колебаний пружинного маятника. Следовательно, заряд q конденсатора, как и координата x маятника, изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса.

ФОРМУЛА ТОМСОНА Введя обозначение $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$, уравнение (1) можно переписать в виде

$$q'' = -\omega_0^2 q. \quad (2)$$

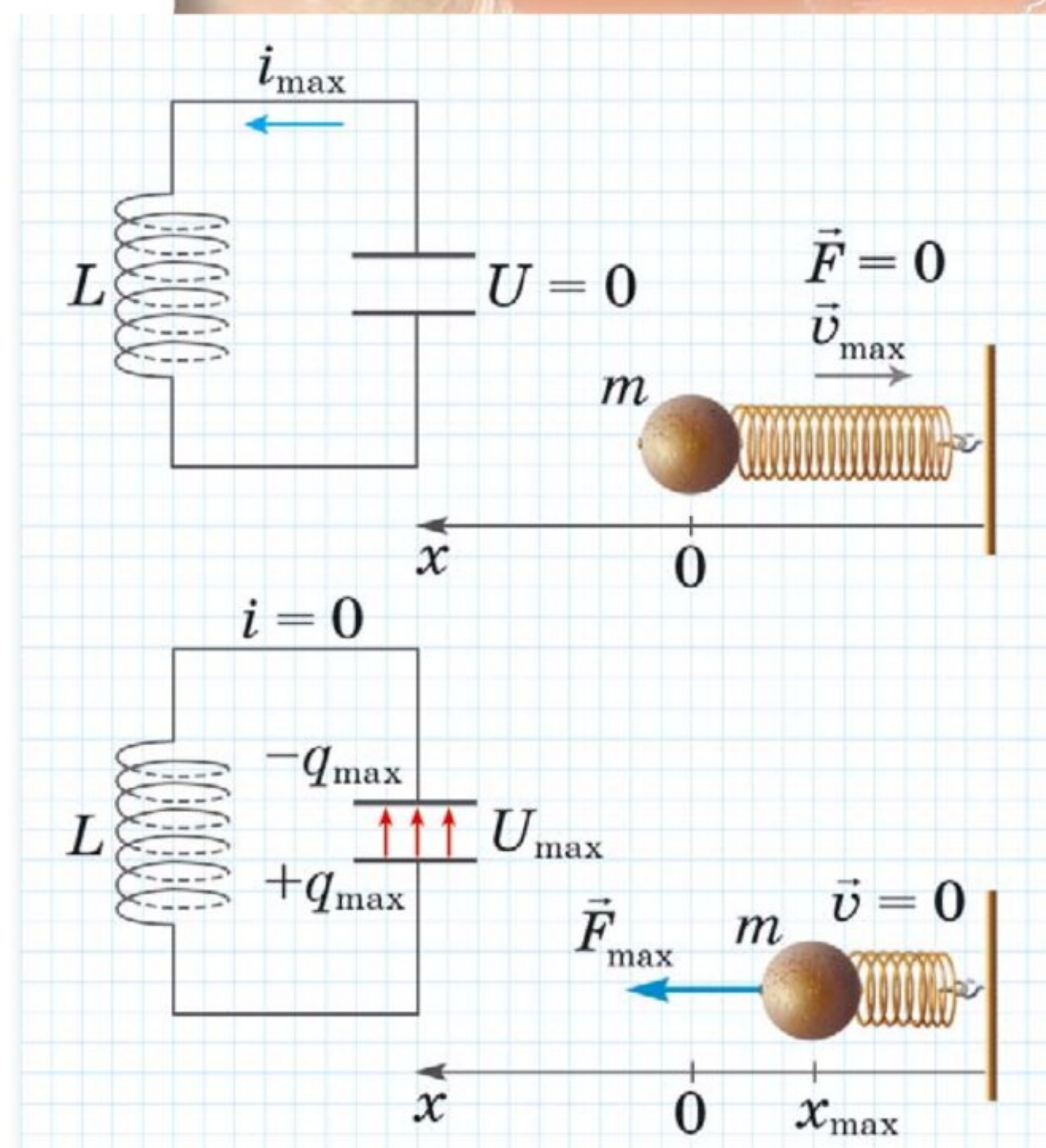
Если в начальный момент времени $t = 0$ на конденсаторе был максимальный заряд $q_{\max}$, то решением уравнения (2) является функция

$$q = q_{\max} \cos \omega_0 t. \quad (3)$$

В формуле (3) величина $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ представляет собой циклическую (собственную) частоту свободных электромагнитных колебаний. Следовательно, период свободных колебаний в контуре равен

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (4)$$

Формула (4) впервые была получена английским физиком У. Томсоном и носит его имя.



Если обозначить величины: максимальное значение заряда конденсатора — $q_{\max}$, период свободных гармонических колебаний в контуре — T , то зависимость заряда q конденсатора от времени определяется формулой

$$q = q_{\max} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right).$$

ВОПРОСЫ:

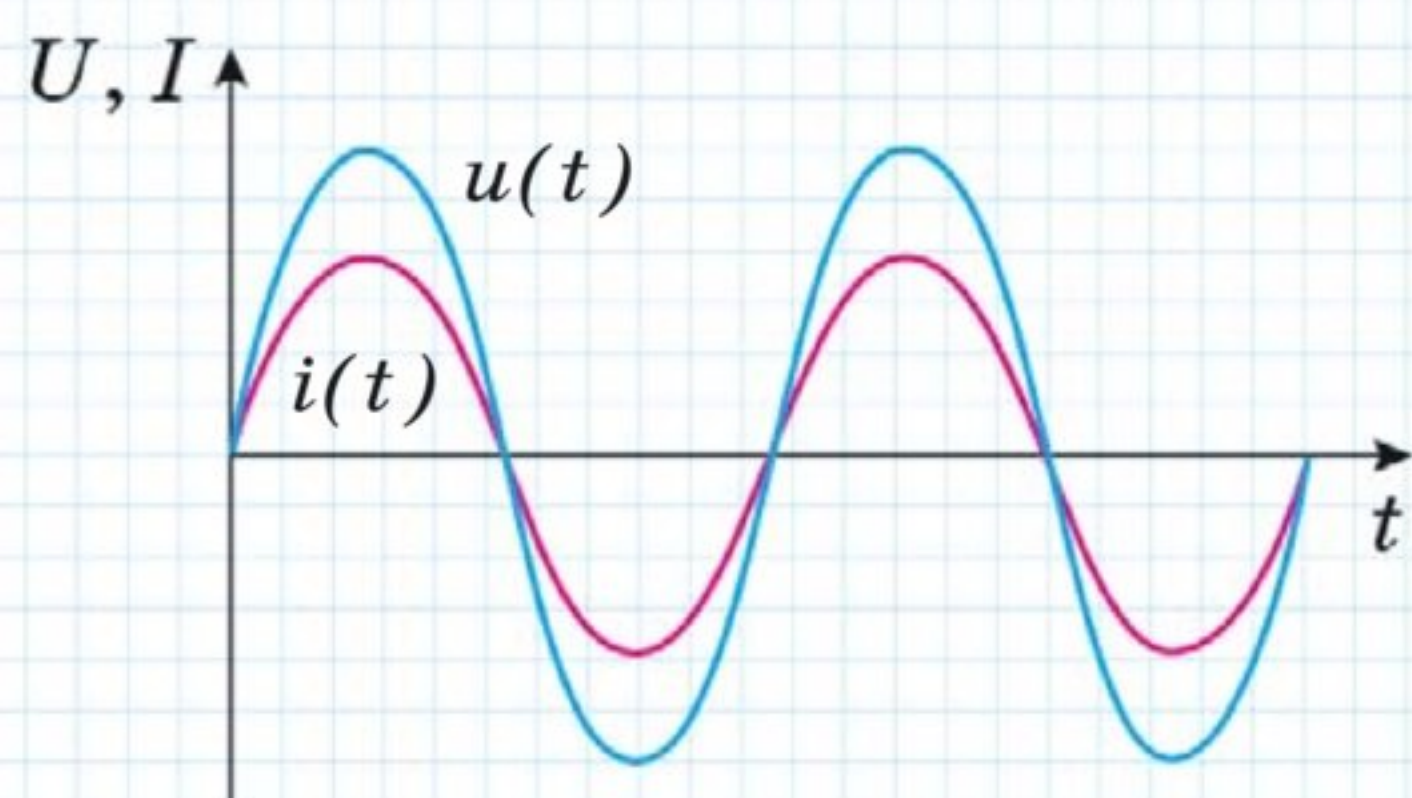
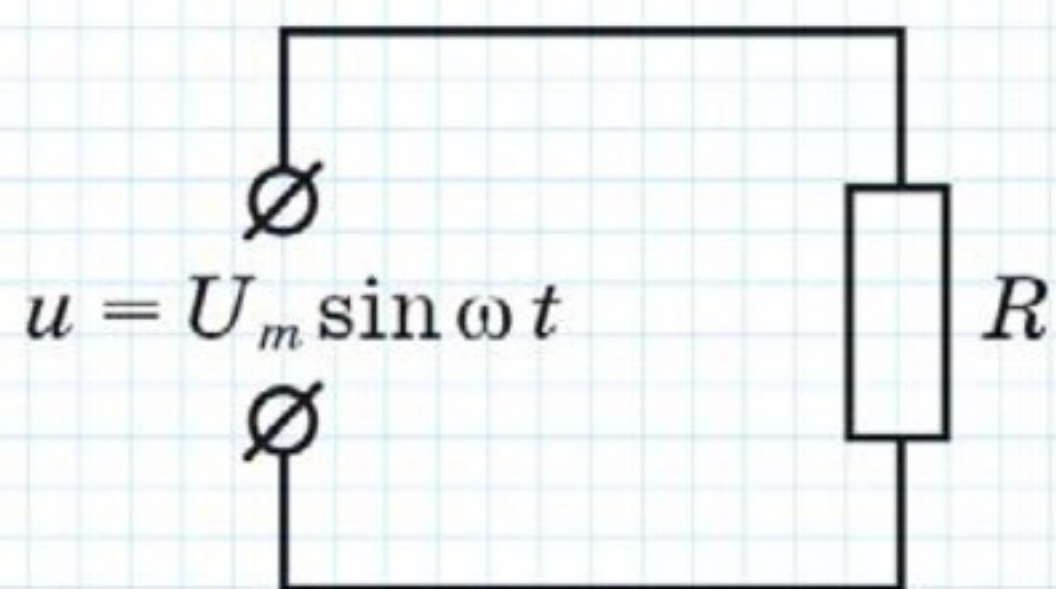
- Можно ли указать электромагнитный аналог импульса тела?
- В чём заключается физическая сущность инертных свойств индуктивности контура?
- Если циклическая частота колебаний заряда конденсатора равна ω_0 , то чему равна циклическая частота колебаний электрической и магнитной энергии в контуре?
- Как изменится период собственных колебаний, если к конденсатору контура подключить параллельно точно такой же конденсатор?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какое сопротивление называется активным.
- Что такое мгновенная и средняя мощность переменного тока.
- Что такое действующее значение силы переменного тока.
- Что такое действующее значение напряжения переменного тока.

ВСПОМНИТЕ:

- Как записывается закон Ома для участка цепи?
- Что такое мощность постоянного тока и как её вычисляют?
- Какие колебания называют гармоническими?



МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Мгновенное значение силы переменного тока непрерывно меняется, поэтому для измерения переменных токов используют их тепловые действия. Тепловое действие переменного тока изучим на примере цепи, состоящей из источника и резистора.

РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Подключим к источнику переменного напряжения, изменяющегося по синусоидальному закону, резистор R , обладающий активным сопротивлением. Сопротивление резистора называют активным потому, что цепь, состоящая из таких резисторов, поглощает энергию, поступающую от источника. При этом полагается, что резистор R не обладает ни ёмкостью, ни индуктивностью. Учитывая, что напряжение на зажимах цепи меняется по гармоническому закону $u = U_m \sin \omega t$, где U_m — амплитуда напряжения, для мгновенного значения силы тока согласно закону Ома получим

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Равенство (1) показывает, что в цепи с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения. При этом амплитуду силы тока выражают формулой

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (2)$$

МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Мгновенные значения силы тока и напряжения переменного тока непрерывно изменяются с промышленной частотой 50 Гц. Поэтому непрерывно изменяется и мгновенная мощность тока $p = iu$, однако мы не замечаем таких быстрых изменений мощности. На самом деле интерес представляет *средняя мощность тока* за много периодов колебаний. Поскольку мощность представляет собой отношение энергии, поступающей от источника в цепь за период, к периоду, то можно ограничиться вычислением средней мощности за период. В течение малого временного промежутка переменный ток можно считать неизменным. Поэтому по аналогии с выражением для мощности постоянного тока

$$P = I^2 R \quad (3)$$

мгновенную мощность, выделяющуюся на участке цепи, обладающем активным сопротивлением R , следует записать в виде

$$p = i^2 R. \quad (4)$$

Подставив в формулу (4) выражение (1) для силы тока, получим

$$p = I_m^2 R \sin^2 \omega t. \quad (5)$$

С учётом известного из тригонометрии соотношения $\sin^2 \alpha = \frac{(1 - \cos 2\alpha)}{2}$ выражение (5) для мгновенной мощности можно записать по-другому:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2} (1 - \cos 2\omega t). \quad (6)$$

Используя общепринятое обозначение среднего значения величины $\bar{p}$, согласно (6) запишем

$$\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2} (\overline{1 - \cos 2\omega t}) = \frac{I_m^2 R}{2} - \frac{I_m^2 R}{2} \overline{\cos 2\omega t}. \quad (7)$$

Принимая во внимание график зависимости функции $y = \cos 2\omega t$ от времени, нетрудно понять, что среднее за период значение этой функции равно нулю. Действительно, как видно из графика, на протяжении первой четверти периода $\cos 2\omega t$ принимает ряд положительных значений, а на протяжении второй четверти периода — такой же ряд отрицательных значений. Аналогичный характер изменения функции наблюдается во втором полупериоде. Следовательно, согласно (7) получим

$$\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (8)$$

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Формулу (8) для средней мощности можно записать аналогично выражению (3) для мощности постоянного тока. Как видно из формул (4) и (8), среднее значение квадрата силы тока i^2 равно $I_m^2/2$. Поэтому с учётом выражения (3) имеем

$$I^2 R = \bar{i^2} R = \frac{I_m^2}{2} R. \quad (9)$$

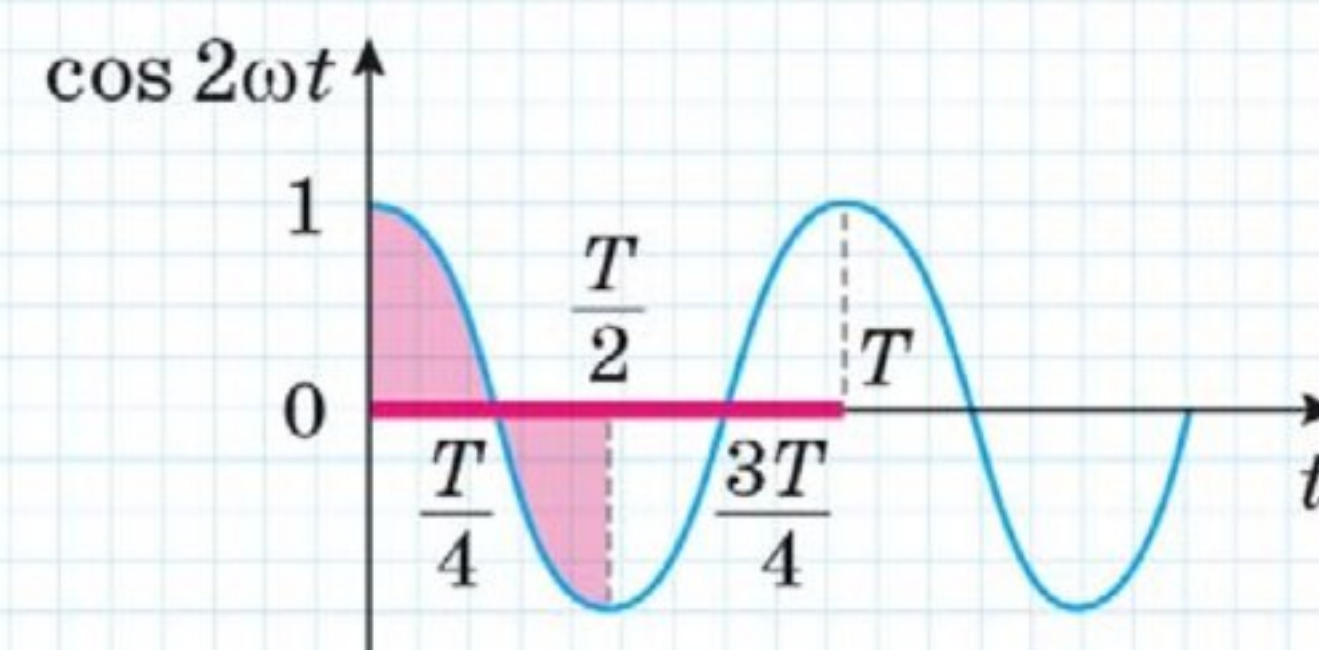
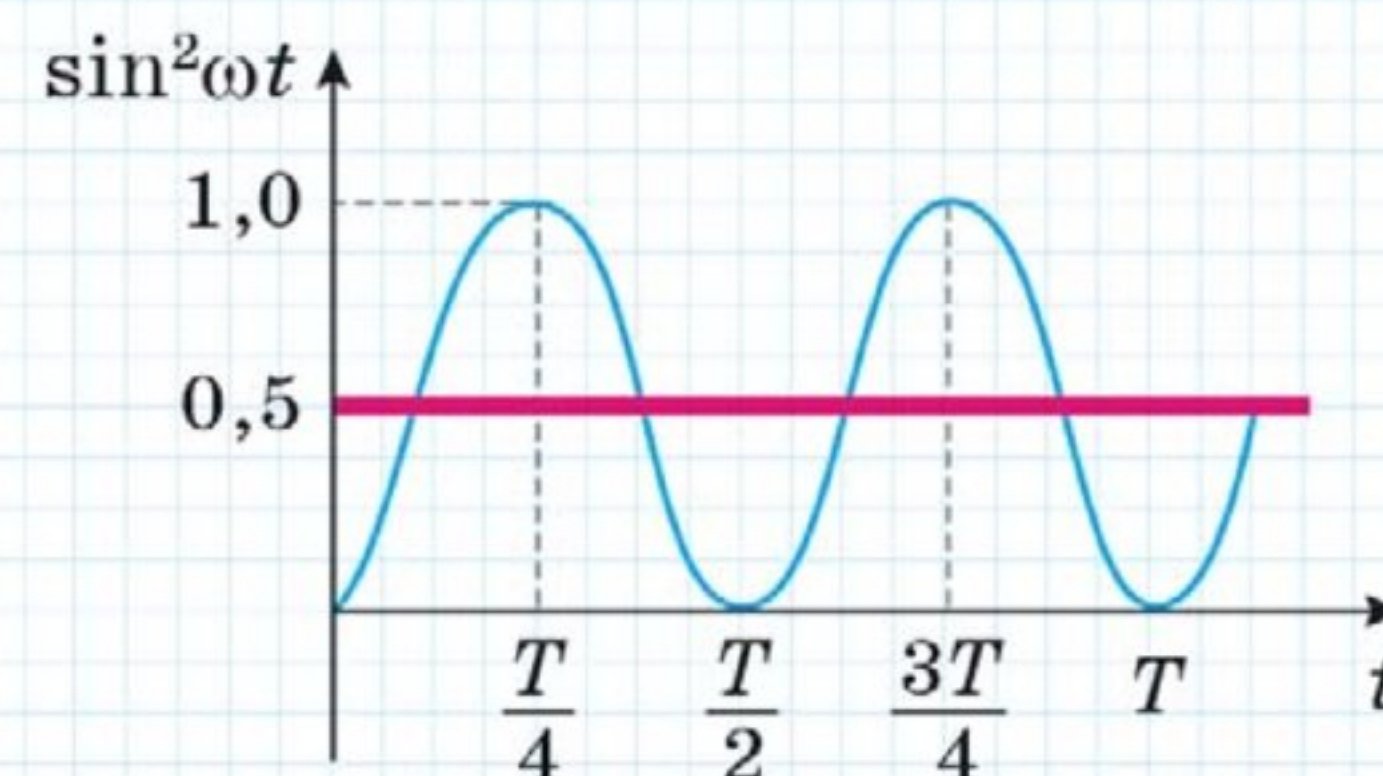
Равенство (9) показывает, что при определённом значении силы постоянного тока мощность, выделяемая на участке цепи этим током, будет равна мощности, выделяемой на этом участке переменным током. Это значение силы переменного тока называется **действующим значением силы переменного тока**:

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Действующее значение напряжения переменного тока определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Взаимосвязь между действующими значениями силы тока и напряжения даётся формулой, аналогичной формуле (2), т. е. законом Ома.



Амперметры и вольтметры, используемые в цепях переменного тока, измеряют именно действующие значения силы тока и напряжения. Работа этих приборов основана на тепловом действии тока, на свойстве проводников увеличивать свою длину при их нагревании электрическим током.

ВОПРОСЫ:

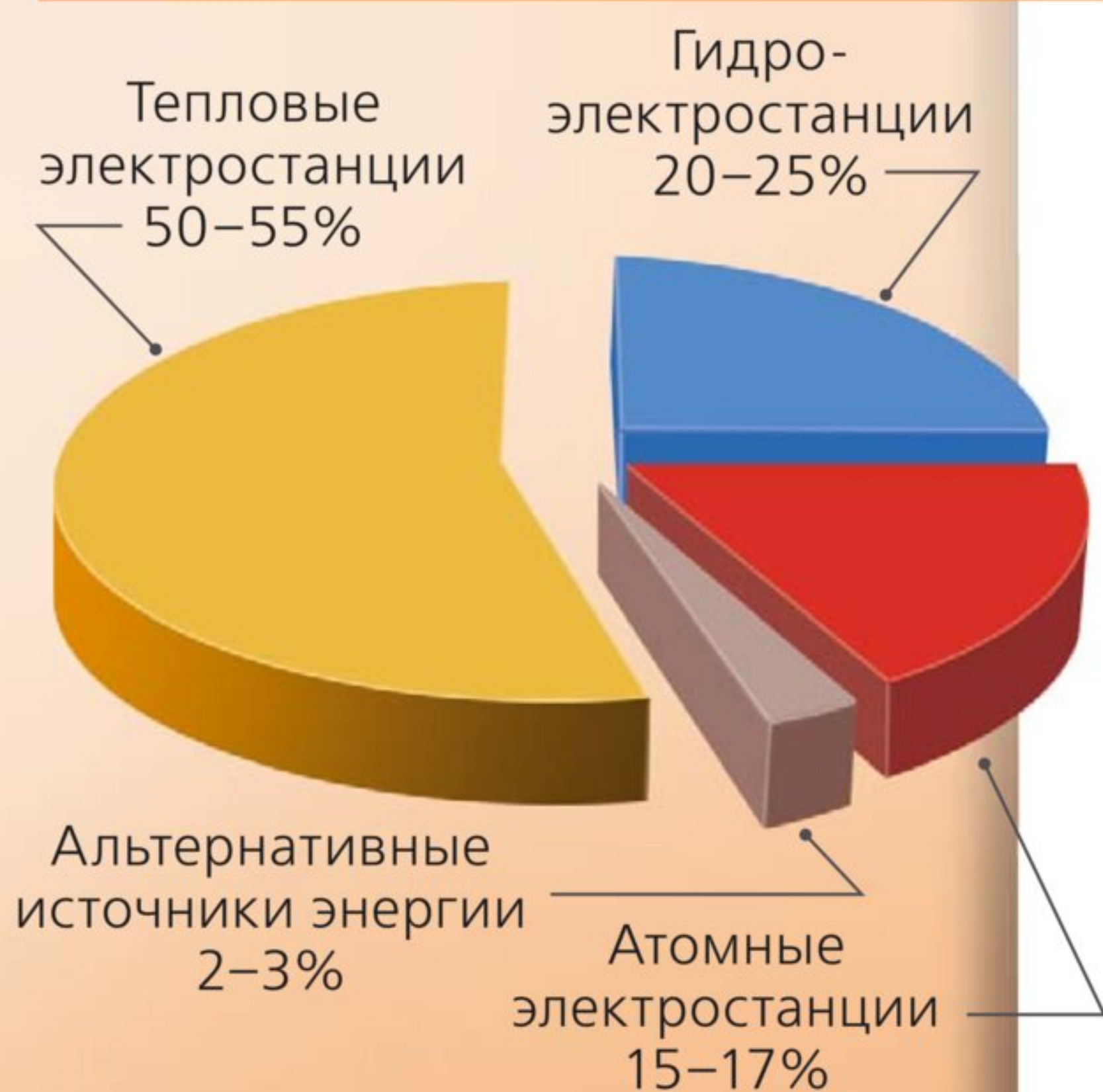
- Как связаны сила тока и напряжение в цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление?
- Как связаны по фазе колебания силы тока и напряжения в цепях с активным сопротивлением?
- Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?
- В городских квартирах используется переменное напряжение 220 В. Какова амплитуда этого напряжения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как энергия природного топлива и энергия гидроресурсов превращается в электрическую энергию.
- Что собой представляет атомная энергетика.
- Какие экологические проблемы возникают при производстве электроэнергии.
- Какие альтернативные источники энергии существуют.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое турбина?
- Что такое генератор электрического тока?
- Какова частота переменного тока, используемого в промышленности и в быту в нашей стране?
- Что такое КПД теплового двигателя и от чего он зависит?

**ПЛОТИНА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ****ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Электрическая энергия может вполне заслуженно претендовать на лидирующую роль среди других видов энергии, настолько широко и многообразно её применение во всех сферах нашей жизни.

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Сегодня электроэнергия производится в основном на электростанциях трёх типов: тепловых, гидроэлектрических и атомных.

На тепловых электростанциях внутренняя энергия природного горючего (уголь, газ, нефть, сланцы и т. п.) преобразуется, как правило, в энергию струи горячего водяного пара, которая направляется на лопасти паровой турбины, приводя её во вращательное движение. Поскольку турбина и ротор генератора электрического тока имеют общую ось, то при вращении турбины механическая энергия струи пара превращается в энергию тока, вырабатываемого генератором.

КПД современных тепловых электростанций превышает 40%, что достигается увеличением температуры пара свыше 500 °С и давления почти до 25 МПа.

Одной из разновидностей тепловых электростанций являются так называемые теплоэлектроцентрали, в которых часть энергии отработанного пара используется для промышленных и бытовых нужд, в частности для отопления жилых домов и снабжения горячей водой. Поэтому КПД теплоэлектроцентралей достигает 70%.

На гидроэлектростанциях вращение ротора генератора, вырабатывающего электрический ток, осуществляется за счёт потенциальной энергии воды. Падающая с большой высоты вода направляется на лопасти гидротурбины, которая приводит во вращение генератор. При этом мощность станции зависит как от высоты плотины, создающей нужный напор воды, так и от массового расхода воды через гидротурбину.

Скорость вращения гидротурбины значительно меньше скорости вращения паровой турбины, поэтому для получения переменного тока промышленной частоты $\nu = 50$ Гц при низкой частоте вращения ротора генератора используются многополюсные роторы. Например, если гидротурбина вращается с частотой, в n раз меньшей стандартной частоты $\nu = 50$ Гц, то ротор генератора должен иметь n пар полюсов. В этом случае частота переменной ЭДС, возбуждаемой в обмотках статора, будет равна 50 Гц.

На атомных электростанциях используется энергия, выделяющаяся в атомных реакторах при делении атомных ядер, как правило, ядер урана. Эта энергия идёт на нагревание и превращение в пар высокого давления воды, которая прокачивается через реактор. Далее пар

направляется на турбину, которая непосредственно связана с электрогенераторами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ Основным потребителем электроэнергии, несомненно, является промышленность. На её долю приходится свыше 70% производимой электроэнергии. Крупным потребителем электроэнергии является также железнодорожный транспорт. Огромное количество электродвигателей, потребляющих энергию электрического тока, приводят в действие станки и механизмы на фабриках и заводах, приводят в движение электровозы, троллейбусы, поезда метро и т. д.

Электроэнергия также необходима для таких энергоёмких процессов, как электрический нагрев и плавление металлов, электролиз, электросварка и т. п.

Использование электрической энергии для освещения городов и сёл, для работы различных бытовых электроприборов не нуждается в особых комментариях.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ При сгорании угля, газа или нефти, используемых для производства электроэнергии, в атмосферу выбрасываются миллионы тонн газообразных веществ, таких, как углекислый газ, метан, оксиды серы, азота и др. Кроме того, в воздух попадают зола, пыль и копоть. Загрязнение воздуха азотными и серными соединениями отрицательно сказывается на здоровье человека, негативно влияет на животный и растительный мир нашей планеты.

Согласно оценкам международных экспертов увеличение ежегодных темпов использования природных энергоресурсов в десятки раз приведёт к повышению средней температуры на Земле примерно на 1 °С. Это чревато катастрофическим повышением уровня Мирового океана в результате таяния ледников и глобальным нарушением сложившихся природных комплексов.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ Экологические проблемы, а также ограниченность невозобновляемых источников энергии (угля, нефти, газа и др.) вынуждают человечество искать новые источники энергии. Здесь прежде всего необходимо отметить энергию солнечного излучения, которую можно преобразовывать в электроэнергию с помощью фотоэлементов, объединённых в батареи. Кроме того, в ряде стран (Германия, Нидерланды и др.) строят ветровые электростанции, которые уже сегодня дают весомый вклад в общий объём энергопотребления. Уже существуют электростанции, использующие энергию морских приливов и отливов, принцип работы которых основан на перепаде уровней воды, возникающий при этих явлениях.

Следует также упомянуть о так называемых геотермальных электростанциях, использующих энергию природных горячих источников воды.

В настоящее время ведутся работы по созданию промышленных магнетогидродинамических генераторов (МГД-генераторов). В МГД-генераторах механическая энергия потока ионизированного газа, т. е. плазмы, движущегося в магнитном поле, непосредственно превращается в электрическую энергию.

ВОПРОСЫ:

- Какие виды электростанций производят сегодня основную долю электроэнергии?
- Почему крупные электростанции, особенно тепловые, оказывают негативное влияние на биосферу?
- Почему необходимо развивать альтернативные способы получения электрической энергии?
- С чем могут быть связаны, по вашему мнению, ограничения на возможности использования альтернативных источников энергии?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Чем обусловлены потери электрической энергии при её передаче на большие расстояния.
- Почему передачу электрической энергии выгодно осуществлять при высоком напряжении.
- Что такое трансформатор и для каких целей он предназначен.
- Что такое коэффициент трансформации.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон Джоуля—Ленца?
- Что такое мощность тока и как она вычисляется?
- В чём заключается явление индукции и самоиндукции?

Современные генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию под напряжением, не превышающим 15–20 кВ. Для уменьшения потерь эту энергию необходимо передавать под напряжением порядка 250–500 кВ.

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ТРАНСФОРМАТОР

Электрическая энергия в нашей стране зачастую производится в местах, весьма удалённых от больших городов и крупных производств. Поэтому передача электрической энергии на большие расстояния является актуальной задачей.

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

При передаче электрической энергии на расстояние неизбежно происходят потери энергии вследствие нагревания проводов. Эти потери, в соответствии с законом Джоуля—Ленца, прямо пропорциональны квадрату силы тока в линии электропередачи:

$$Q = I^2 R t, \quad (1)$$

где R — сопротивление линии.

Сопротивление двухпроводной линии длиной l и площадью поперечного сечения провода S рассчитывают по формуле

$$R = \rho \frac{2l}{S}, \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление металлического проводника.

При большой протяжённости линии передачи потери энергии могут быть весьма значительными. Уменьшить потери энергии за счёт уменьшения сопротивления линии не представляется возможным, поскольку увеличение поперечного сечения проводов потребовало бы большого расхода металла и чрезмерно утяжелило бы провода. Поэтому для уменьшения потерь остаётся единственная возможность — уменьшать силу тока. Чтобы при уменьшении силы тока в несколько раз передаваемая мощность оставалась неизменной, необходимо во столько же раз повысить напряжение в линии.

Если полезная нагрузка работает при напряжении U , то потребляемая ею мощность $P = UI$. Поскольку $I = P/U$, то с учётом формул (1) и (2) потери мощности ΔP на линии составляют

$$\Delta P = \frac{2\rho l P^2}{U^2 S}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), при заданной мощности нагрузки P мощность тепловых потерь уменьшается обратно пропорционально квадрату напряжения. Если передача электроэнергии осуществляется под большим напряжением порядка нескольких сотен тысяч вольт, то потери мощности удаётся свести к минимуму.

Вместе с тем многие потребители электроэнергии рассчитаны на гораздо меньшее напряжение, например, 220 В или 380 В. Поэтому необходимы устройства, способные понижать или повышать напряжение переменного тока практически без потерь мощности.

ТРАНСФОРМАТОР Повышение и понижение напряжения переменного тока осуществляется с помощью трансформаторов. Для практических целей трансформатор впервые был применён русским учёным П. Н. Яблочковым и усовершенствован в дальнейшем другим российским учёным И. Ф. Усагиным.

Трансформатор состоит из двух катушек (обмоток) изолированной проволоки, которые надеты на общий железный сердечник в виде рамки. Обмотку, которая подключается к источнику переменного напряжения, называют **первичной** (№ 1). Обмотку, к которой подключается какое-либо устройство, потребляющее электроэнергию, называют **вторичной** (№ 2).

Принцип работы трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Изменяющийся во времени магнитный поток, создаваемый переменным током в витках первичной обмотки, практически без потерь проходит внутри сердечника и возбуждает в витках вторичной обмотки ЭДС самоиндукции.

Пусть первичная обмотка состоит из N_1 витков, каждый из которых пронизывает магнитный поток Φ . При его изменении суммарная ЭДС индукции, наводимая в первичной обмотке, будет равна $N_1 \Delta\Phi / \Delta t$. Если пренебречь активным сопротивлением обмотки, то модули напряжения на её зажимах и ЭДС индукции оказываются практически равными:

$$U_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (4)$$

Поскольку вторичную обмотку, состоящую из N_2 витков, пронизывает тот же магнитный поток Φ , то суммарная ЭДС, наводимая в её витках, равна $N_2 \Delta\Phi / \Delta t$.

Если выводы вторичной обмотки разомкнуты (режим холостого хода), то, аналогично равенству (4), напряжение на её концах равно

$$U_2 = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (5)$$

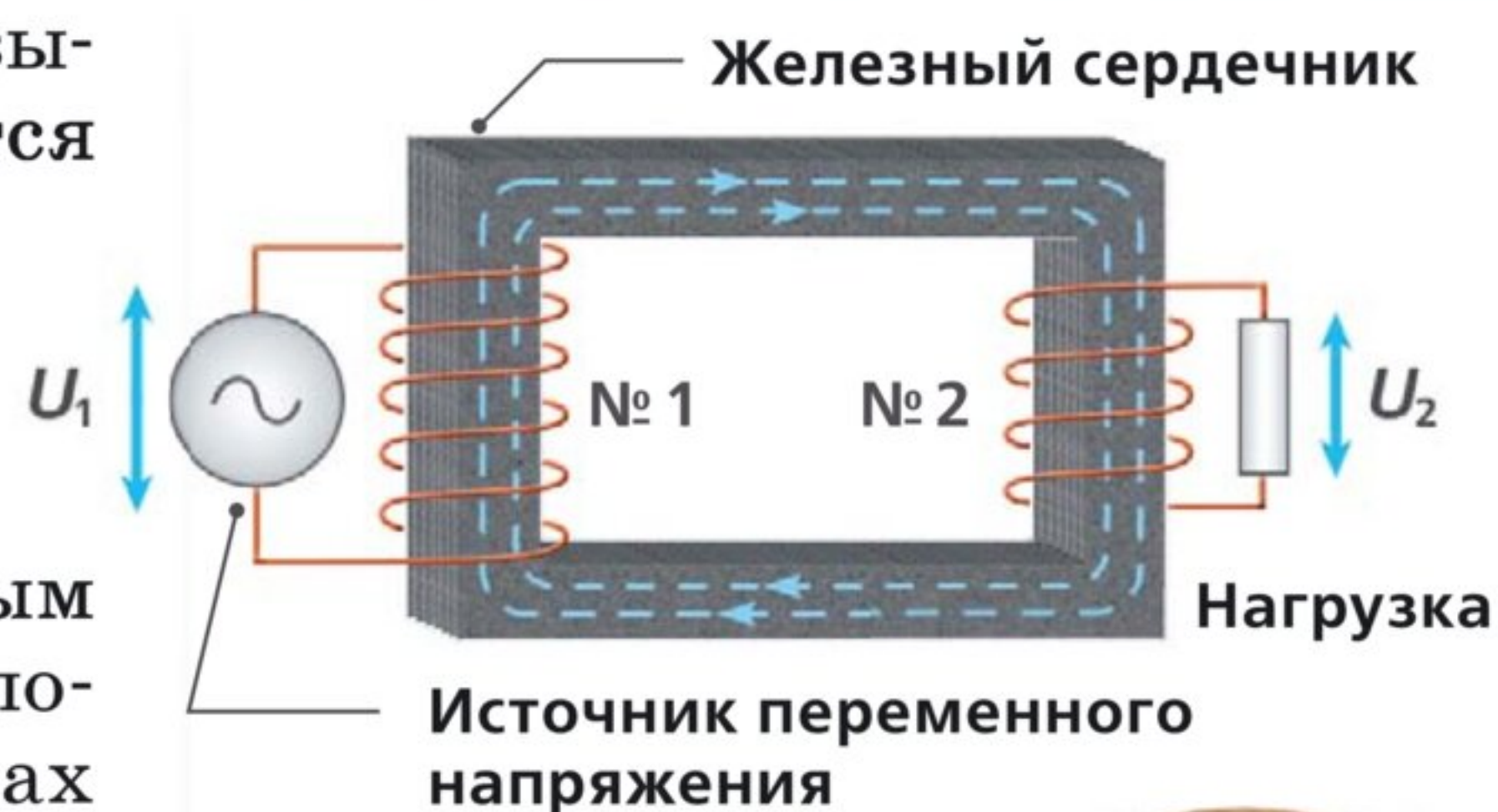
С учётом формул (4) и (5) имеем

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (6)$$

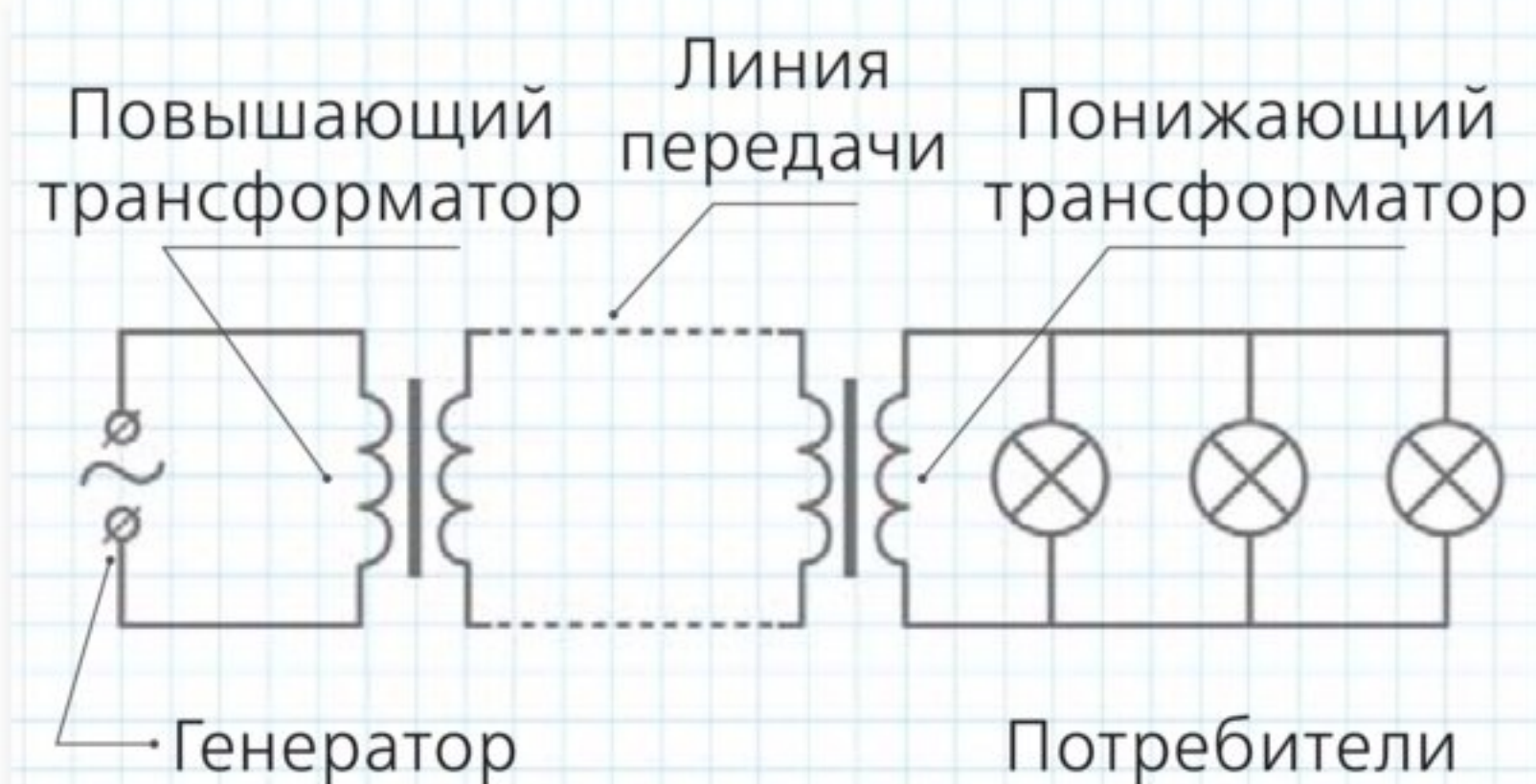
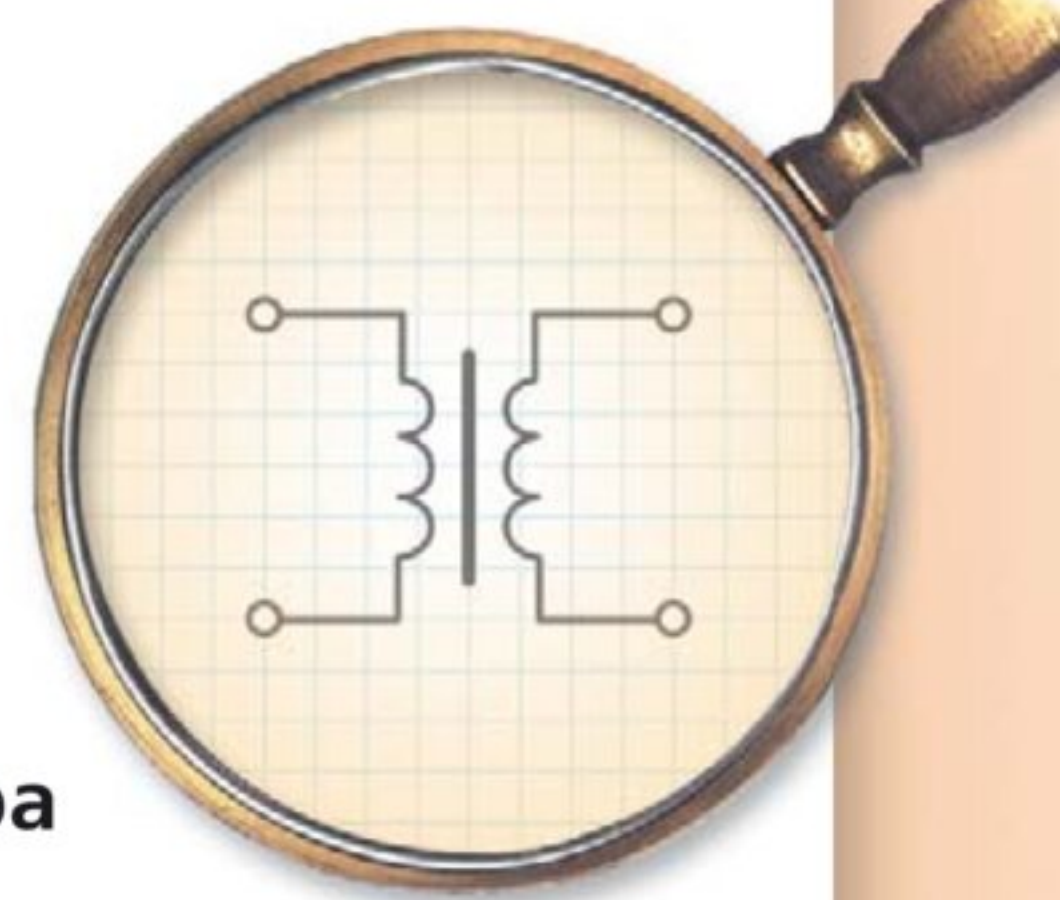
Величину k называют **коэффициентом трансформации**. При $k > 1$ трансформатор называют **понижающим**, при $k < 1$ — **повышающим**. Рабочим режимом трансформатора является режим, когда вторичная обмотка подключена к нагрузке. При этом мощность $P_2 = I_2 U_2$, потребляемая нагруженной вторичной обмоткой, почти равна мощности $P_1 = I_1 U_1$, подводимой к первичной обмотке: $I_2 U_2 \approx I_1 U_1$. Следовательно, токи в обмотках нагруженного трансформатора обратно пропорциональны напряжениям на обмотках:

$$I_2 / I_1 \approx U_1 / U_2. \quad (7)$$

Современные трансформаторы, предназначенные для преобразования переменных токов больших мощностей, обладают рекордно высоким КПД — до 98–99%!



Условное обозначение трансформатора



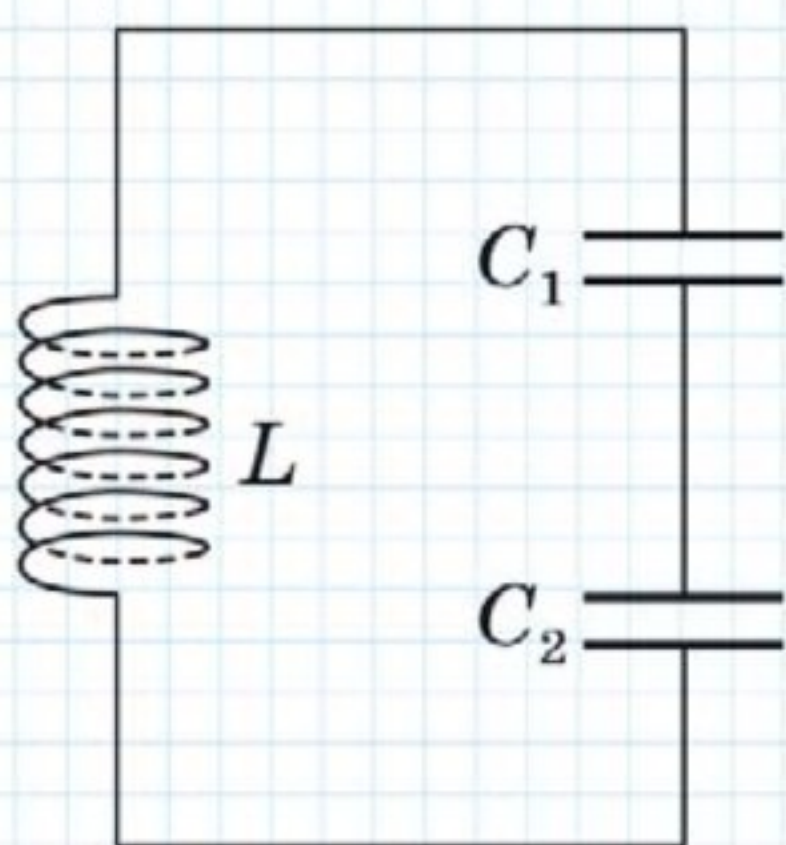
ВОПРОСЫ:

- Можно ли многократно уменьшить потери электроэнергии путём уменьшения сопротивления линии электропередачи?
- Во сколько раз уменьшатся потери на нагревание проводов при повышении напряжения в 10 раз?
- На каком явлении основана работа трансформатора?
- В чём заключается различие режима холостого хода и режима нагрузки работы трансформатора?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление периода электромагнитных колебаний.
- Как решать задачи на составление уравнений электромагнитных колебаний.
- Как решать задачи на нахождение КПД трансформатора.



ЗАДАЧА 1 Колебательный контур состоит из двух последовательно соединённых конденсаторов и катушки индуктивности. В процессе колебаний один из конденсаторов (например, ёмкостью C_1) пробивается и сопротивление между его обкладками становится равным нулю. Как при этом изменится частота электромагнитных колебаний?

Решение:

Поскольку при пробое конденсатора произошло закорачивание данного участка цепи, то его можно заменить на проводник с нулевым сопротивлением. В результате электрическая ёмкость контура увеличится. Согласно формуле Томсона период свободных незатухающих колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Следовательно, период колебаний также увеличится. Соответственно частота колебаний уменьшится.

Ответ: частота колебаний уменьшится.

ЗАДАЧА 2 Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью 2 мкФ и катушки индуктивностью 0,3 Гн. Определите период собственных колебаний контура. Как изменится период колебаний, если ёмкость конденсатора увеличить в 4 раза, а индуктивность катушки уменьшить в 9 раз?

Дано:
 $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
 $L_1 = 0,3 \text{ Гн}$
 $C_2 = 4C_1$
 $L_2 = L_1/9$

СИ
 $2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$

Решение:

Период собственных колебаний контура можно найти по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

$$T_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,3 \text{ Гн} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} \approx$$

$$\approx 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 4,9 \text{ мс};$$

$T_1 — ?$

$\frac{T_2}{T_1} — ?$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{L_2C_2}}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{\sqrt{\frac{L_1}{9} \cdot 4C_1}}{\sqrt{L_1C_1}} = \sqrt{\frac{4}{9}} = \frac{2}{3} = \frac{1}{1,5}.$$

Ответ: $T_1 = 4,9 \text{ мс}$, период колебаний уменьшится в 1,5 раза.

ЗАДАЧА 3 Действующее значение силы переменного тока частотой 50 Гц и действующее значение напряжения на резисторе равны соответственно 0,5 А и 12 В. Запишите уравнения для мгновенных значений силы тока, напряжения и мощности.

Дано:

$I = 0,5 \text{ A}$

$U = 12 \text{ В}$

$\nu = 50 \text{ Гц}$

 $i(t) — ?$ $u(t) — ?$ $p(t) — ?$

Решение:

Уравнение для мгновенного значения силы тока имеет вид $i(t) = I_m \sin \omega_0 t$.Амплитудное значение силы тока связано с действующим значением: $I_m = \sqrt{2} I$.Собственная частота электромагнитных колебаний $\omega_0 = 2\pi\nu$.

Подставив числовые значения, получим

$$I_m = \sqrt{2} \cdot 0,5 \text{ A} = 0,7 \text{ A}; \quad \omega_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц} = 314 \text{ рад/с.}$$

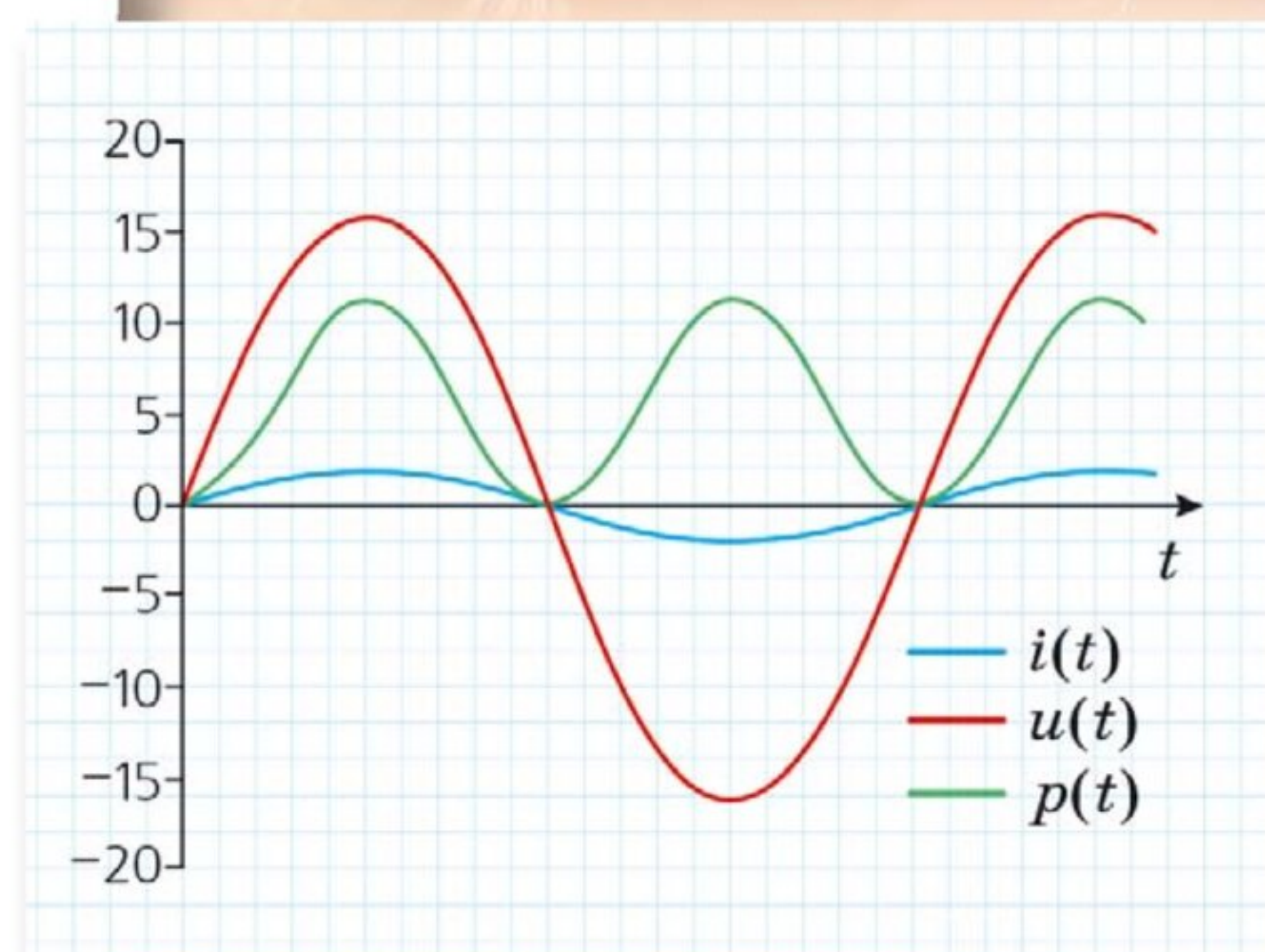
В результате уравнение для силы тока записывается в следующем виде: $i(t) = 0,7 \sin(314t)$.

Аналогичные вычисления выполняем для напряжения:

$$U_m = \sqrt{2} U = \sqrt{2} \cdot 12 \text{ В} \approx 17 \text{ В}; \quad u(t) = 17 \sin(314t).$$

Мгновенное значение мощности равно произведению мгновенных значений силы тока и напряжения, поэтому $p(t) = i(t) \cdot u(t) = 0,7 \sin(314t) \cdot 17 \sin(314t) = 11,9 \sin^2(314t)$.Ответ: $i(t) = 0,7 \sin(314t)$; $u(t) = 17 \sin(314t)$;

$$p(t) = 11,9 \sin^2(314t).$$



ЗАДАЧА 4 Трансформатор, первичная обмотка которого состоит из 160 витков, подключён в цепь с действующим значением напряжения 220 В. Действующее значение силы тока в первичной обмотке 2,7 А. К вторичной обмотке трансформатора, содержащей 40 витков, подключена полезная нагрузка сопротивлением 5 Ом. Найдите действующее значение силы тока во вторичной обмотке и КПД трансформатора, если сопротивление вторичной обмотки 0,5 Ом.

Дано:

$N_1 = 160$

$N_2 = 40$

$U_1 = 220 \text{ В}$

$I_1 = 2,7 \text{ А}$

$R_{\text{н}} = 5 \text{ Ом}$

$R_{\text{об}} = 0,5 \text{ Ом}$

Решение:

В режиме холостого хода $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

$$\text{Откуда } U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1},$$

$$U_2 = 220 \text{ В} \cdot \frac{40}{160} = 55 \text{ В.}$$

В рабочем режиме

$$U_2 = U_{\text{н}} + U_{\text{об}} = I_2 R_{\text{н}} + I_2 R_{\text{об}}.$$

$$\text{Поэтому } I_2 = \frac{U_2}{R_{\text{н}} + R_{\text{об}}}; \quad I_2 = \frac{55 \text{ В}}{5 \text{ Ом} + 0,5 \text{ Ом}} = 10 \text{ А.}$$

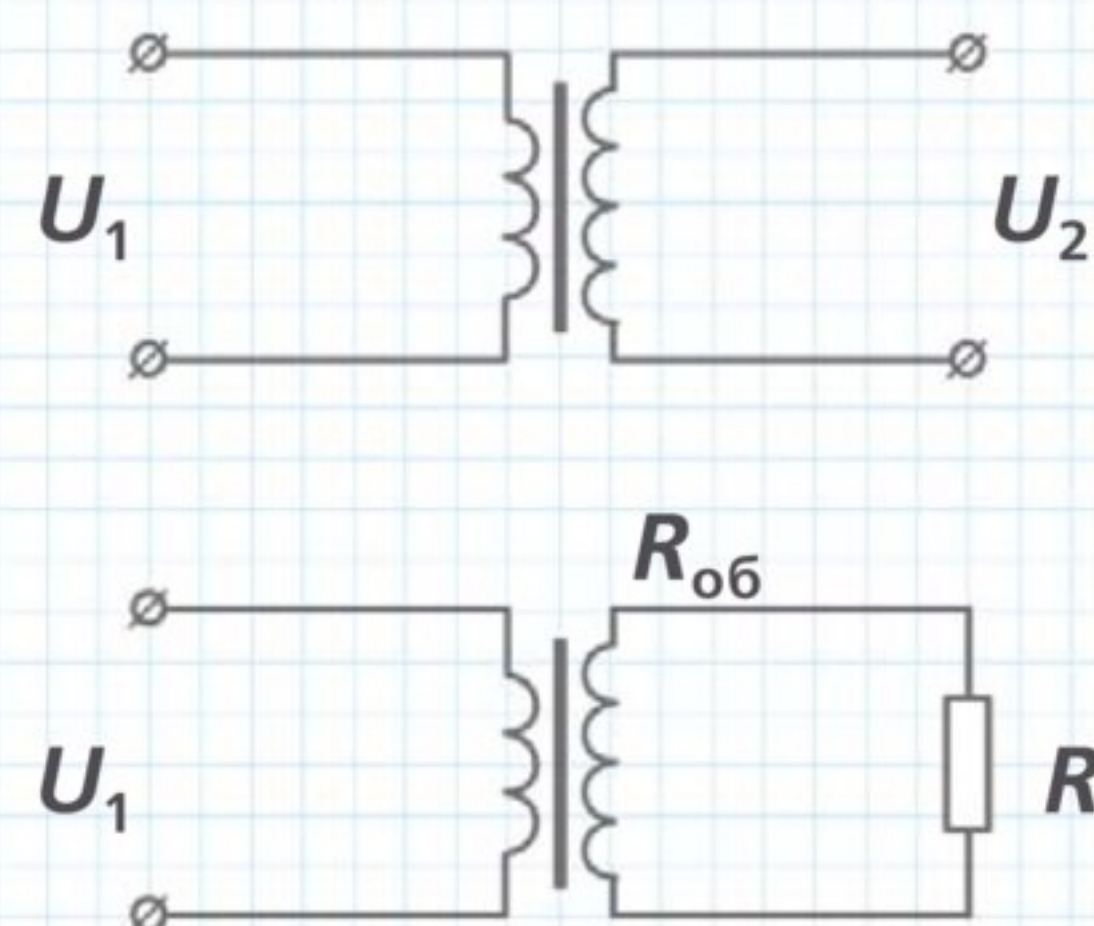
КПД трансформатора можно найти по формуле

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%;$$

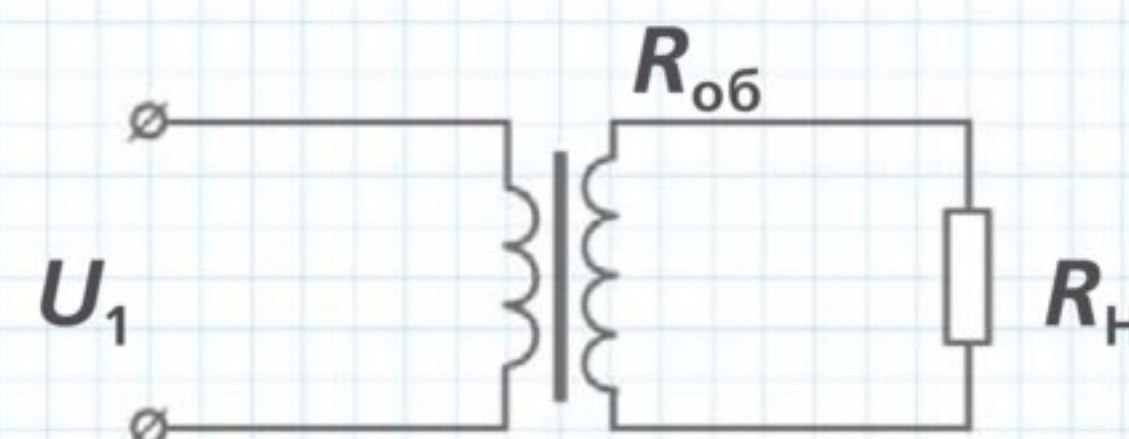
$$\eta = \frac{10 \text{ А} \cdot 55 \text{ В}}{2,7 \text{ А} \cdot 220 \text{ В}} \cdot 100\% \approx 92,6\%.$$

Ответ: $I_2 = 10 \text{ А}$; $\eta = 92,6\%$.

Режим холостого хода



Рабочий режим



$$q = q_{\max} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАРЯДА В КОНТУРЕ

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$u = U_m \sin\omega t$$

$$i = I_m \sin\omega t$$

РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

ТРАНСФОРМАТОР

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$I_2/I_1 \approx U_1/U_2$$

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Научно-популярный
физико-математический
журнал «Квант»
<http://gotourl.ru/13725>

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- При электромагнитных колебаниях в электрической цепи происходят периодические изменения заряда, силы тока и напряжения.
- Для изучения свободных электромагнитных колебаний используют колебательный контур, который состоит из конденсатора и присоединённой к его обкладкам катушки.
- Свободные электромагнитные колебания быстро затухают. Для получения вынужденных колебаний используют генераторы, в которых возбуждается периодически изменяющаяся ЭДС. Вынужденные гармонические колебания силы тока называют переменным током.
- В цепи с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения.
- Действующее значение силы переменного тока — это значение силы постоянного тока, при котором мощность, выделяемая на участке цепи этим током, равна мощности, выделяемой на этом участке переменным током.
- Для уменьшения потерь электроэнергии при передаче на большие расстояния необходимо повышать напряжение. Повышение и понижение напряжения переменного тока осуществляется с помощью трансформаторов.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

ПОДРОБНЕЕ...

Большая книга экспериментов для школьников. — М.: Росмэн, 2001.

Суорц К.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 2. / К. Э. Суорц. — М.: Наука, 1987.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2001.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- По медной проволоке, проходящей между полюсами подковообразного магнита, пропускают переменный ток промышленной частоты. Что будет происходить с проводником?
- Что нужно сделать, чтобы при введении в катушку колебательного контура железного сердечника частота колебаний осталась той же, что и без сердечника?
- Чем опасно замыкание хотя бы одного витка в обмотках трансформатора?



Глава 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

- ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ
- ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН
- ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. СВОЙСТВА ЗВУКА
- ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

РАЗДЕЛ II



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустою забавою.

К. Прутков

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как колебания распространяются в упругой среде.
- Что собой представляют волны на поверхности воды.
- Переносят ли упругие волны вещество и энергию.
- Какие волны называют продольными волнами, а какие — поперечными.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое колебательное движение?
- Какие виды упругих деформаций существуют в различных средах?

ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Как правило, тело, совершающее механические колебания, находится в некоторой среде — в воздухе, воде и др. При этом тело будет воздействовать на частицы среды, приводя их в колебательное движение. Благодаря силам упругости колебания будут передаваться от одних частиц среды другим частицам. В результате колебательные движения будут распространяться в среде.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ВОДЕ. ВОЛНЫ

Каждому рыбаку хорошо известно, что во время поклёвки от поплавка по поверхности воды начинают распространяться круги. Эти кольцеобразные образования представляют собой волну.

Волны на поверхности воды могут быть не только круговыми. Например, часто наблюдаются волны, набегające на берег под действием сильного ветра, дующего над поверхностью водоёма.

Независимо от причин возникновения волн на поверхности воды в их образовании основную роль играют силы тяжести и силы поверхностного натяжения.

УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Если один конец пружины, расположенной горизонтально, закрепить, а другой конец ритмично сжимать и отпускать, то по пружине будет распространяться волна.

При сжатии пружины возникает сила упругости, которая заставляет витки пружины разжиматься. В результате в этом месте пружины возникает разрежение.

При периодическом воздействии витки, подобно маятнику, будут колебаться около положений равновесия, то сближаясь, то удаляясь друг от друга. Под действием сил упругости эти колебания начнут передаваться от витка к витку вдоль всей пружины.

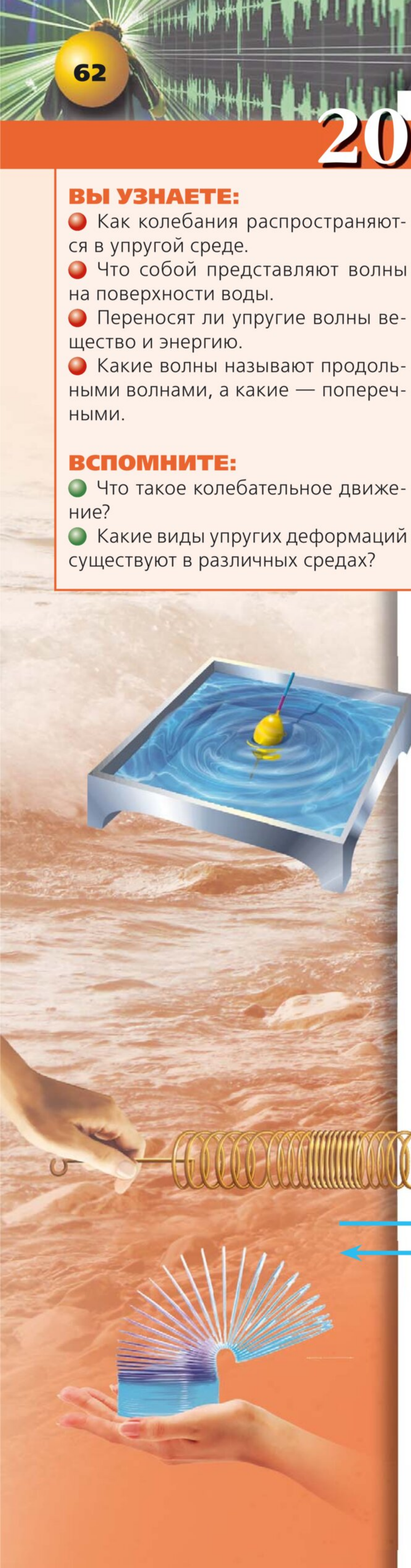
Указанные возмущения, распространяющиеся вдоль пружины, представляют собой так называемые **упругие волны**.

Как и в случае волн на поверхности воды, упругие волны являются бегущими волнами, которые при распространении в пространстве переносят энергию без переноса вещества.

Таким образом, образование упругих волн и их распространение связано с возникновением сил упругости, вызванных деформациями среды.

ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ

Характер деформаций обусловлен тем, что частицы среды могут смещаться как вдоль направления распространения волны,



так и перпендикулярно этому направлению. Волны, в которых колебания частиц среды происходят вдоль направления их распространения, называют **продольными**. Распространение таких волн можно описать с помощью модели, в которой частицы среды представлены в виде совокупности шариков и пружинок.

При этом шарики испытывают смещения вдоль цепочки, а пружинки растягиваются или сжимаются, т. е. имеют место деформации растяжения или сжатия.



В жидкостях или газах такая деформация сопровождается уплотнением или разрежением среды.

Поскольку при сжатии и разрежении упругие силы возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах, то продольные волны могут распространяться в любых средах — твёрдых, жидких и газообразных.

Если в рассмотренном выше примере один из шариков попеременно смещать в направлении, перпендикулярном цепочке, то в пружинках, соединяющих этот шарик с соседними, будет происходить сдвиг витков, т. е. возникнут деформации сдвига.

В результате вдоль цепочки начнёт распространяться волна, в которой колебания происходят перпендикулярно направлению её распространения.

Как показали детальные исследования, волны на поверхности воды не являются ни продольными, ни поперечными. На самом деле частицы воды не колеблются относительно равновесных положений, а движутся по некоторым замкнутым траекториям. При этом для волн на поверхности воды выполняются все общие закономерности волнового движения.



Волны, в которых колебания частиц среды происходят перпендикулярно направлению распространения волны, называют **поперечными волнами**.

В жидкостях и газах упругие деформации сдвига не возникают. Это означает, что смежные слои жидкости или газа могут свободно скользить друг относительно друга без проявления упругих сил. Поэтому поперечные волны не могут существовать в жидкой и газообразной среде и распространяются только в твёрдых средах.

ВОПРОСЫ:

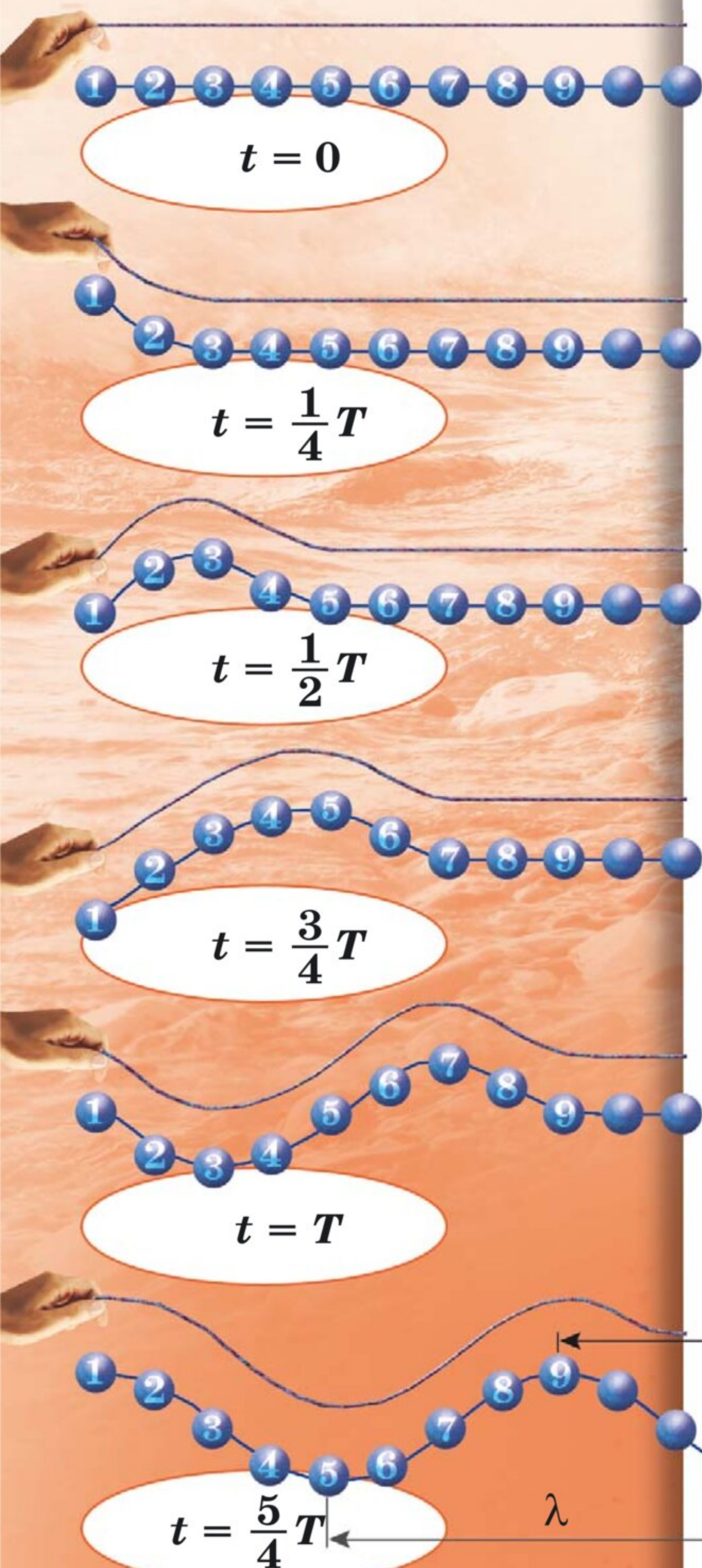
- Каким образом колебания передаются от одних участков среды к другим участкам?
- В каких средах могут распространяться продольные волны, а в каких — поперечные?
- Какие виды деформаций определяют характер волн, способных распространяться в твёрдых, жидких и газообразных средах?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое длина волны.
- Что понимают под скоростью распространения волны.
- Как зависит скорость волны от свойств среды, в которой распространяется волна.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое волны и при каких условиях возможно их распространение?
- Какие виды волн существуют?
- Что такое период и частота колебаний?
- Какие колебания называют гармоническими?



ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Используя модель, состоящую из цепочки соединённых упругими пружинками шариков, рассмотрим более подробно процесс образования поперечной волны.

ДЛИНА ВОЛНЫ Пронумеровав определённое количество шариков, проследим за движением каждого из них. Для этого приведём первый шарик в движение и заставим его совершать колебания. Нас будет интересовать, как распространяется волна через каждые четверть периода ($1/4 T$) колебания первого шарика.

При смещении шарика **1** возникнут силы упругости, которые начнут действовать на шарик **2** и заставят его двигаться вслед за шариком **1**. Это приведёт к возникновению силы упругости, действующей на шарик **3**, и т. д. Поскольку на возникновение деформации и сил упругости необходимо некоторое время, то шарик **2** начнёт смещаться позднее шарика **1**, шарик **3** — позднее шарика **2** и т. д. Поэтому, когда за первую четверть периода колебаний шарик **1** окажется в положении максимального отклонения, а шарик **2** будет продолжать своё движение, шарик **3** только начнёт смещаться из начального положения.

За вторую четверть периода шарик **1** вернётся в положение равновесия, а шарик **3** испытает максимальное отклонение. При этом шарик **5** только начнёт движение.

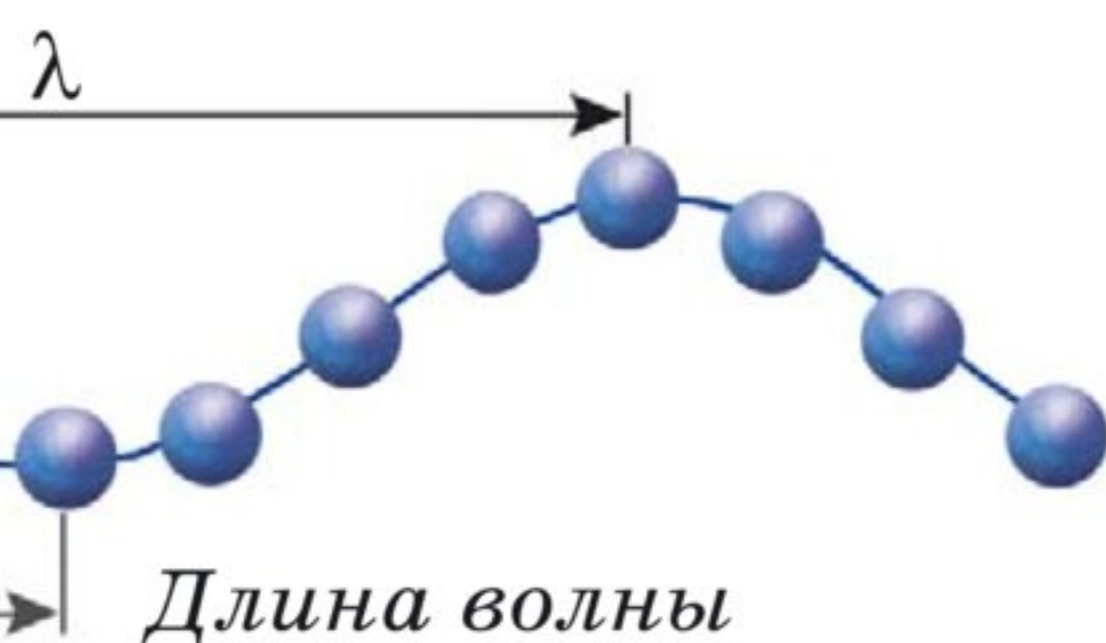
К концу третьей четверти периода шарик **1** испытает максимальное отклонение в противоположном направлении, шарик **3** будет проходить положение равновесия, шарик **5** испытает максимальное отклонение, а шарик **7** только начнёт своё движение.

По окончании периода шарик **1** завершит полное колебание и снова окажется в положении равновесия, шарик **3** отклонится на амплитудное значение вниз, шарик **5** будет проходить положение равновесия, шарик **7** отклонится на амплитудное значение вверх, а шарик **9** только начнёт движение.

Следовательно, характер колебаний шариков **1** и **9** оказывается одинаковым. Спустя ещё четверть периода они оба окажутся в положении максимального отклонения вверх, а ещё через четверть периода окажутся в положении равновесия.

Таким образом, за время, равное периоду колебаний, волна распространится от точки **1** среды (шарик **1**) до точки **9** (шарик **9**).

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется **длиной волны**. Поскольку колебания шариков **1** и **9** про-



исходят с одинаковыми фазами, то *длину волны можно определить так же, как наименьшее расстояние между точками, колеблющимися с одинаковыми фазами*. Легко видеть, что это расстояние равно расстоянию между двумя соседними гребнями или впадинами поперечной волны. В случае продольной волны длина волны равна расстоянию между соседними сгущениями или разрежениями частиц среды, в которой распространяется волна.

Длину волны обозначают греческой буквой λ (лямбда). Её основной единицей в СИ является *метр* (1 м).

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ Любые волны распространяются с определённой скоростью. Скорость волны следует понимать как скорость распространения колебаний в среде.

Поскольку за время, равное периоду колебаний T , волна распространяется на расстояние, равное длине волны λ , то

$$\lambda = vT.$$

Следовательно, скорость распространения волны равна

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Поскольку частота колебаний ν — величина, обратная периоду колебаний, то скорость распространения волны можно выразить через частоту колебаний:

$$v = \lambda\nu.$$

В случае гармонических колебаний, которые происходят по закону синуса или косинуса, форма волны представляет собой синусоиду, которая повторяется через отрезки длиной λ вдоль направления распространения волны.

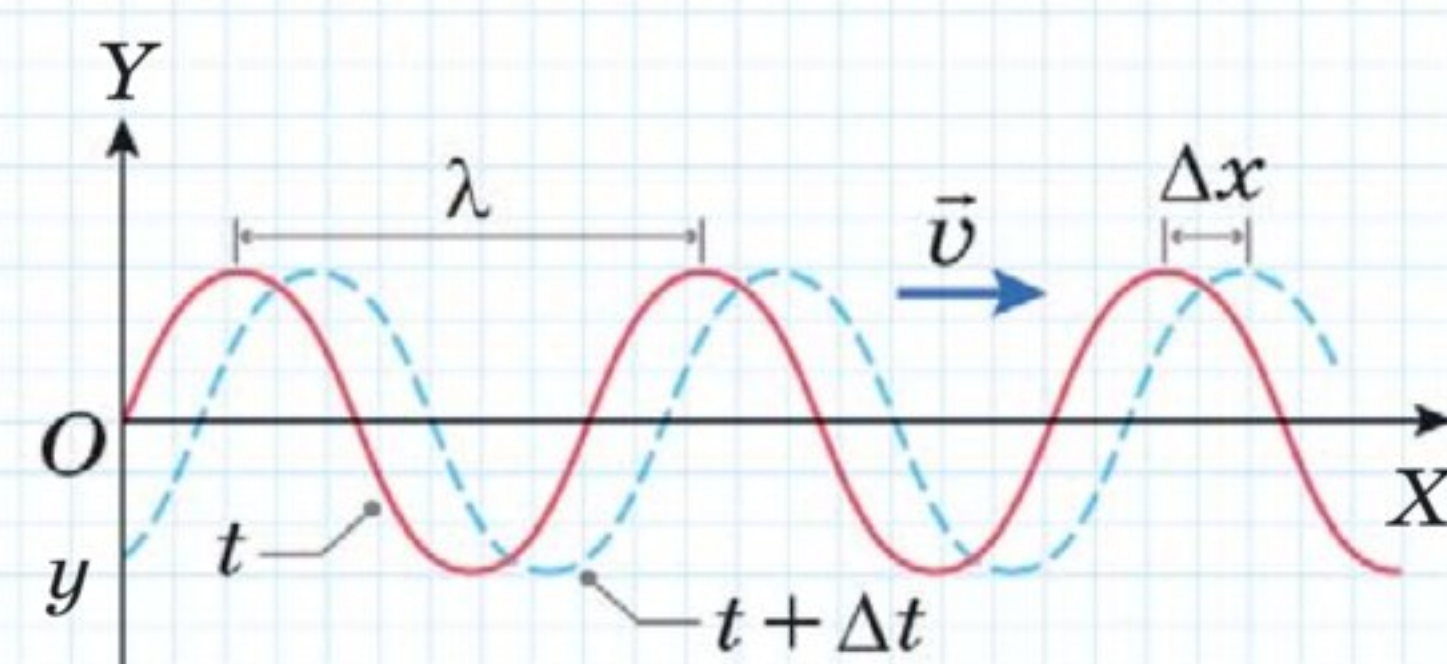
Если смещение колеблющейся точки от положения равновесия обозначить буквой y , а волна распространяется вдоль оси OX , то «мгновенные фотографии» волны в момент времени t (сплошная линия) и $t + \Delta t$ (пунктир) представляют собой профиль волны в соответствующий момент. При этом волна за время Δt перемещается на расстояние Δx , и, следовательно, скорость волны

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

При данной частоте колебаний источника скорость распространения волны, а также длина волны зависят от свойств среды, в которой распространяется волна. Главным образом это связано с агрегатным состоянием вещества. В твёрдых телах связь между частицами велика, а в жидких они взаимодействуют друг с другом значительно слабее. В газах взаимодействие между частицами совсем слабое. Поэтому скорость распространения волны в твёрдых телах наибольшая, а в газах наименьшая.

Если обозначить величины: длина волны — λ , частота колебаний — ν , период колебаний — T , то скорость распространения волны рассчитывают по формуле

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$



ВОПРОСЫ:

- Что называют длиной волны?
- От каких характеристик колебаний зависит скорость волны?
- Как связаны между собой скорость, длина волны и частота колебаний частиц в волне?
- В процессе распространения волна переходит из одной среды в другую среду, плотность которой меньше. Как при этом изменяется скорость волны?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как распространяется звук.
- К какому виду волн относятся звуковые волны.
- Какова скорость звука в различных средах.
- От какой характеристики звуковых колебаний зависит громкость звука.
- Что определяет высоту звука.
- Что такое тембр звука.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое колебания и волны?
- Что такое амплитуда и частота колебаний?
- Какие виды механических волн существуют?
- Что такое скорость волны?



СКОРОСТЬ ЗВУКА
в различных средах, м/с

Воздух (при 0 °С)	333
Воздух (при 30 °С)	350
Вода (при 20 °С)	1483
Железо	5850
Гранит	3850
Стекло	5500

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. СВОЙСТВА ЗВУКА

Окружающий нас мир наполнен самыми разнообразными звуками. Важно понимать, как возникают звуки и каким образом они способны распространяться в воздухе или какой-либо другой среде.

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ Общим для всех звуков, начиная от жужжания пчелы и заканчивая рёвом реактивного двигателя, является то, что порождающие их тела колеблются. Например, если закреплённую в лапке штатива узкую металлическую линейку привести в колебательное движение, то она будет сжимать прилегающий к ней слой воздуха, этот слой окажет давление на следующий слой и т. д. В результате в среде начнёт распространяться колебательный процесс.

Как показали исследования, наше ухо способно воспринимать колебания в пределах от 16 до 20 000 Гц. Такие колебания называют **звуковыми**. Звуковые колебания могут возникать в любой среде: газообразной, жидкой или твёрдой.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ Среда, отделяющая нас от колеблющегося тела, — это обычно воздух, частицам которого передаются колебания. Эти частицы передают колебания соседним частицам. В результате в среде образуются чередующиеся сгущения и разрежения воздуха, т. е. распространяется звуковая волна. Звуковые волны в воздухе являются продольными волнами сжатия и разрежения.

Английский физик Р. Бойль в 1660 г. опытным путём доказал, что для распространения звука необходима среда. Поместив под колокол воздушного насоса часы с хорошо слышным ходом и откачав воздух из сосуда, Бойль убедился, что ход часов стал неслышным.

Заметим, что звуковые волны возникают также при быстром движении тела в воздухе. Например, полёт пули или снаряда сопровождается характерным свистом. Это же относится и к потокам жидкости или газа.

СКОРОСТЬ ЗВУКА Звуковые волны, наряду с другими механическими волнами, характеризуются скоростью распространения. Измерения скорости звука в различных средах показали, что в твёрдых телах и жидкостях она значительно больше, чем в воздухе.

Скорость звука также зависит от температуры среды: с повышением температуры она возрастает, с понижением убывает. Это объясняется тем фактом, что с ростом температуры увеличивается скорость движения частиц среды, что приводит к возрастанию скорости передачи упругих деформаций от одних участков среды к другим.

ГРОМКОСТЬ ЗВУКА Звуки, окружающие нас, могут быть громкими или едва слышными. Чтобы выяснить, от какой характеристики звуковой волны зависит громкость звука, можно воспользоваться камертоном. Если ударить по камертону резиновым молоточком, то возникнет чистый музыкальный звук. Чем сильнее молоточек ударяет по камертону, тем громче он звучит. Поднеся лёгкий пробковый шарик к ветви камертона, легко заметить, что, чем громче звучит камертон, тем с большей амплитудой колеблется шарик. Это означает, что камертон, звучащий громче, имеет большую амплитуду колебаний. Следовательно, громкость звука зависит от амплитуды колебаний: *чем больше амплитуда колебаний, тем громче звук.*

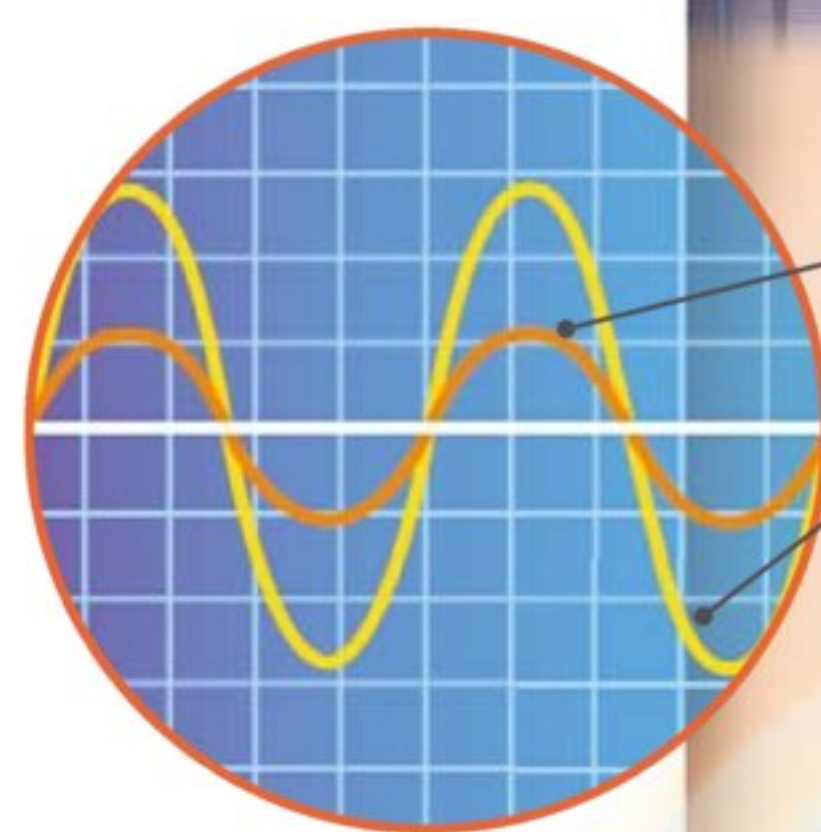
На практике для характеристики громкости звука используют физическую величину, которую называют **звуковым давлением**. Громкость звука, характеризующаяся уровнем звукового давления, измеряется в *белах* (Б) или *децибелах* (дБ), составляющих десятую часть бела.

Как показывает опыт, наше ухо более чувствительно к одним частотам и менее чувствительно к другим. Более громкими воспринимаются звуки, частоты которых лежат в пределах от 1000 до 5000 Гц.

ВЫСОТА ЗВУКА Ещё одной характеристикой, имеющей отношение к свойствам звука, является высота звука. На слух легко различается низкий голос (бас) и высокий (сопрано). Струны музыкальных инструментов также издают звуки разной высоты. Увеличить частоту колебаний струны можно за счёт увеличения её натяжения, при этом звук становится более высоким.

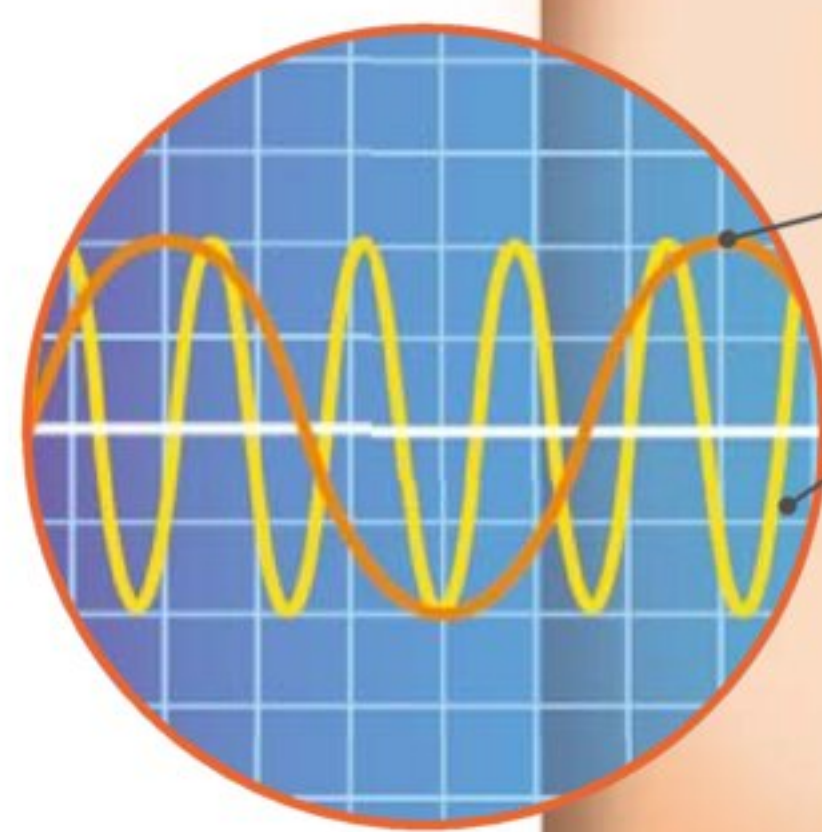
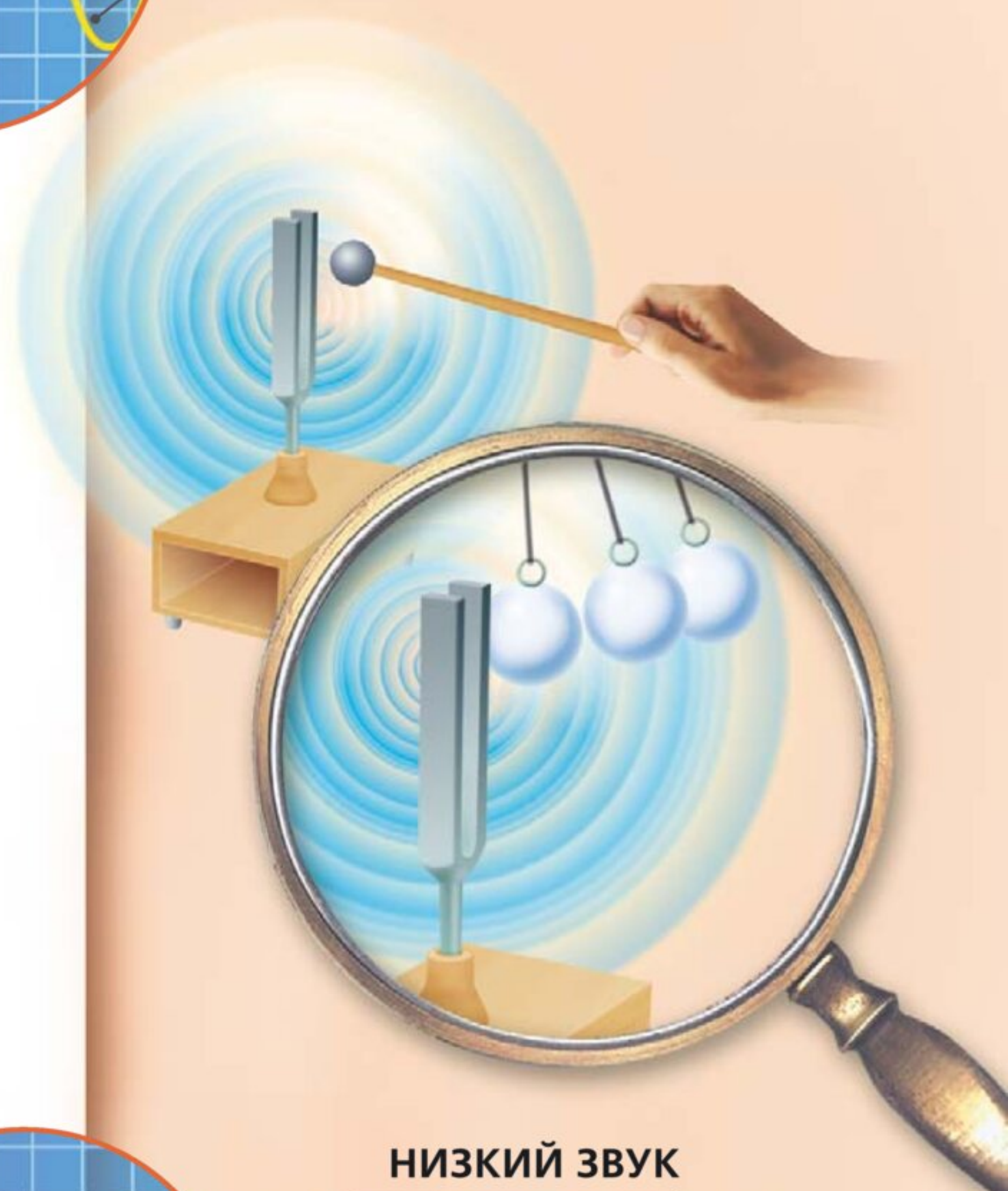
Аналогичные опыты можно выполнить, возбуждая колебания металлической линейки, зажатой в тиски. Если постепенно укорачивать колеблющуюся часть линейки, то нетрудно заметить, что частота колебаний увеличивается, а также возрастает высота звука. Таким образом, высота звука зависит от частоты колебаний: с увеличением частоты колебаний источника звука высота его звучания возрастает.

ТЕМБР ЗВУКА Мы без труда различаем звук гитары и звук рояля или трубы, а также голоса разных людей. Большинство звуков представляют собой совокупность колебаний разных частот. Составляющую наименьшей частоты называют **основным тоном**, который определяет высоту сложного звука. Остальные составляющие звука называют **обертонами**. Набор обертонов определяет **тембр звука**, создавая его окраску.



ТИХИЙ ЗВУК

ГРОМКИЙ ЗВУК

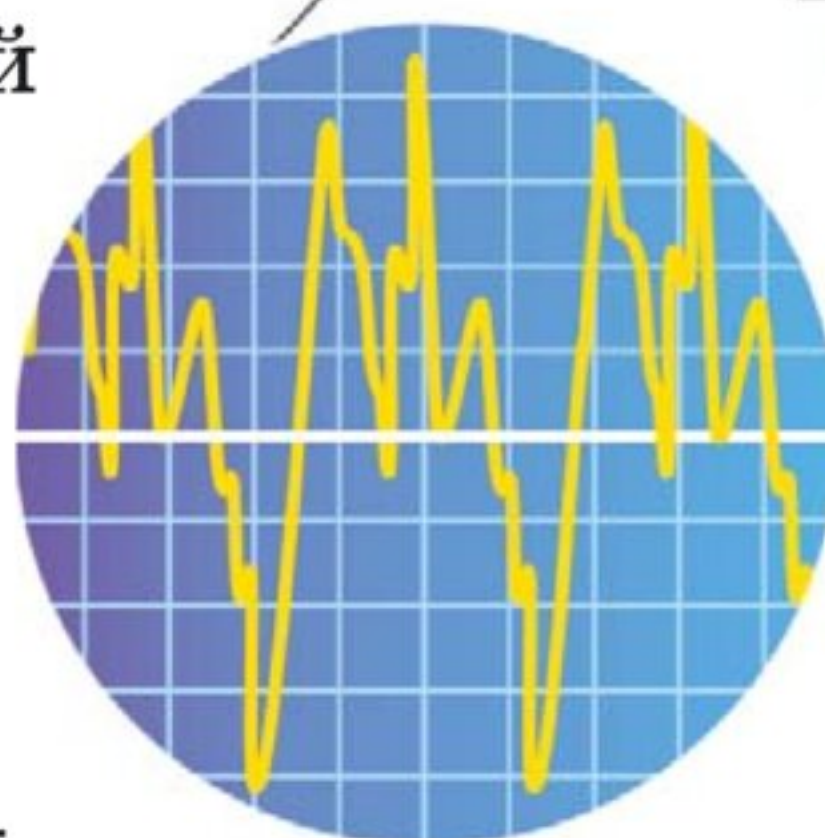


НИЗКИЙ ЗВУК

ВЫСОКИЙ ЗВУК

ОСНОВНОЙ
ТОН

ОБЕРТОНЫ

**ВОПРОСЫ:**

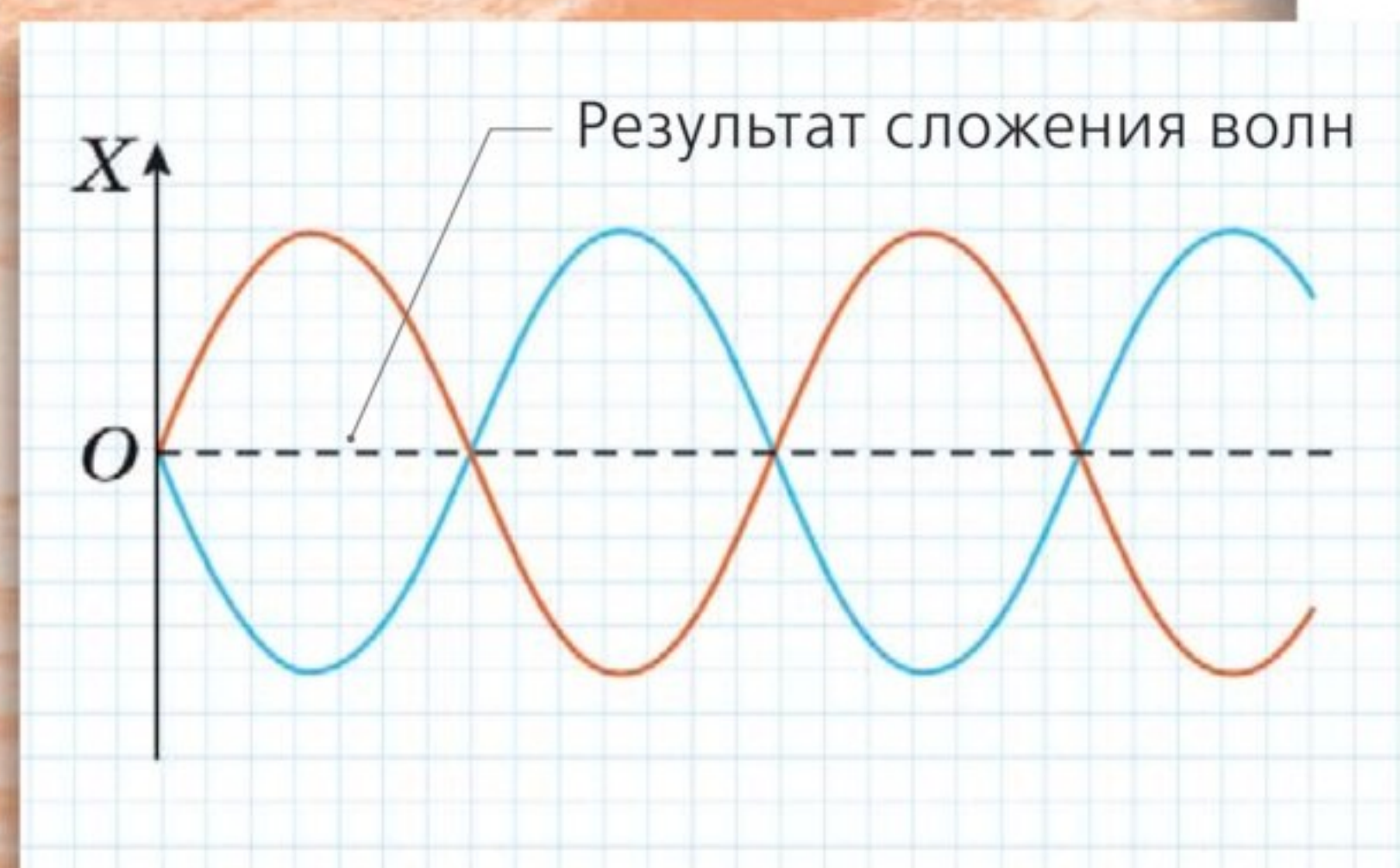
- Какие колебания называют звуковыми?
- От каких свойств среды зависит скорость звука?
- Что такое звуковое давление и как оно влияет на громкость звука?
- В каких единицах измеряется громкость звука?
- От чего зависит громкость звука?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое интерференция волн.
- При каких условиях можно наблюдать интерференцию волн.
- Что такое дифракция волн.
- При каких условиях наблюдается дифракция волн.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое механические волны?
- Что такое амплитуда колебаний?
- Что такое период, частота и длина волны?

Взаимное усиление волн*Взаимное ослабление волн***ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН.
ДИФРАКЦИЯ ВОЛН**

Среди большого разнообразия физических процессов можно выделить такие явления, обнаружение которых позволяет сразу сделать однозначный вывод об их физической природе. К ним относятся явления интерференции и дифракции волн.

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН Возможно, вам приходилось когда-либо наблюдать две кольцевые волны, которые образовались на поверхности воды от двух камней, брошенных одновременно в воду на небольшом расстоянии друг от друга. Эти круговые волны на воде от разных источников проходят сквозь друг друга и распространяются дальше, не претерпев никаких изменений. На этот экспериментальный факт обратил внимание ещё Леонардо да Винчи. Нечто подобное наблюдается и для звуковых волн: когда в оркестре одновременно звучат несколько музыкальных инструментов, наше ухо способно улавливать звучание каждого из них.

Особый интерес представляет картина распределения на поверхности воды амплитуд кольцевых волн: в тех местах, где гребни одной волны встречаются с гребнями другой, получаются более высокие волны, т.е. их амплитуда колебаний больше. В этом случае принято говорить, что волны усиливают друг друга. Там же, где гребни одной волны накладываются на впадины другой, амплитуда колебаний заметно меньше. В этом случае мы наблюдаем взаимное ослабление волн. Если амплитуды волн равны, то возможно их полное гашение, и ряби на поверхности воды в этих местах не будет.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН Рассмотрим более подробно опыт по возбуждению волн на поверхности воды. С этой целью в прямоугольной кювете возбудим две круговые волны с помощью двух ударников в виде шариков (штифтов), укрепленных на пластинке, которая может совершать периодические колебания. При этом в некоторой точке O на поверхности воды будет наблюдаться сложение колебаний, образованных двумя волнами от источников S_1 и S_2 .

Пусть l_1 и l_2 — пути, проходимые волнами от источников до точки наблюдения. Результат сложения волн, приходящих в точку O , будет зависеть от того, в каком состоянии каждая волна достигает данной точки: в виде гребня или в виде впадины. Последнее зависит от разности хода волн $\Delta l = l_1 - l_2$: если разность хода равна длине волны или, в общем случае, целому числу длин волн, то первая волна придёт в точку наблюдения позже второй на время, равное периоду колебаний (целому числу периодов).



В этом случае гребни волн совпадают и наблюдается *усиление колебаний*. Таким образом, амплитуда результирующего колебания в точке O будет *максимальна* при условии

$$\Delta l = m\lambda, \quad (1)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Если на разности хода укладывается половина длины волны (в общем случае нечётное число полуволн), то первая волна отстаёт от второй на половину периода (на нечётное число полупериодов). При такой разности хода гребень одной волны будет накладываться на впадину другой и в точке O произойдёт *взаимное гашение волн*. Следовательно, амплитуда результирующего колебания в точке наблюдения будет *минимальна* при условии

$$\Delta l = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени и пространстве распределение амплитуд результирующих колебаний, называется **интерференцией**. Это возможно только в случаях, когда условия (1) и (2) не изменяются с течением времени.

ДИФРАКЦИЯ ВОЛН Когда распространяющаяся на поверхности воды волна встречает на своём пути препятствие, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, например торчащий из воды прутик, то волна его свободно огибает, смыкаясь за ним.

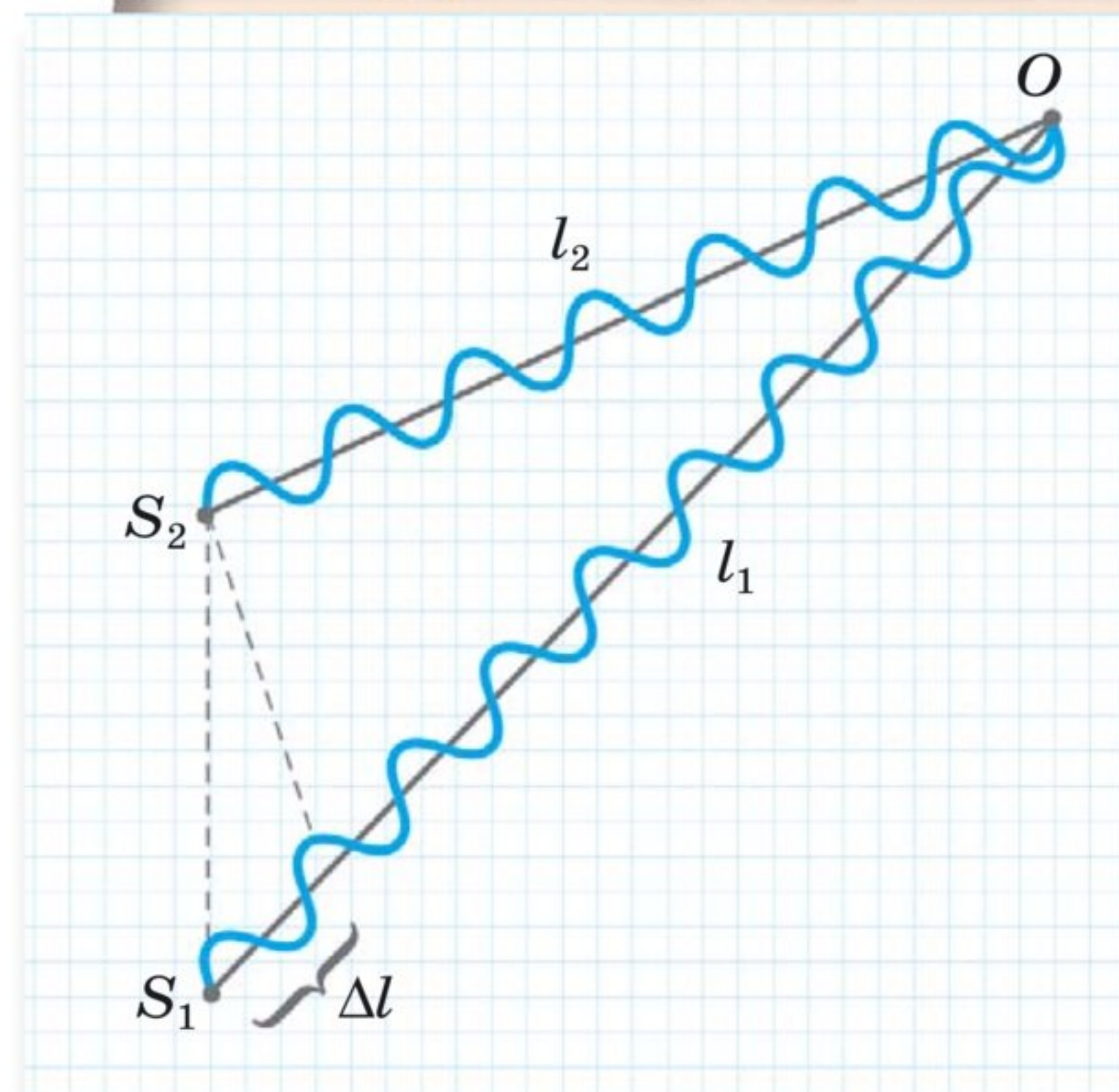
Совсем другая картина наблюдается в случае, если размеры препятствия существенно превосходят длину волны. При этом за препятствием (например, большим камнем или скалой) образуется область невозмущённой водной поверхности. Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называют **дифракцией**.

Опыт, наглядно демонстрирующий явление дифракции, нетрудно осуществить, возбуждив с помощью узкой дощечки волны на поверхности воды, налитой в прямоугольную кювету, снабжённую экраном со щелью.

Как показывают наблюдения, в том случае, когда на пути волн установлен экран со щелью, размеры которой велики по сравнению с длиной волны, волны проходят сквозь щель, практически не меняя своей формы и направления распространения.

Однако если на пути волн поставить экран со щелью, размеры которой меньше длины волны, то картина распространения волн радикально меняется: волны за щелью становятся круговыми, а колебания охватывают всю поверхность за экраном.

Явление дифракции характерно также для звуковых волн: даже при слегка открытой двери шум из коридора легко проникает в комнату.



ВОПРОСЫ:

- Что такое сложение волн?
- Что называется интерференцией волн?
- Как записывают условия максимумов и минимумов интерференционной картины?
- Что называют дифракцией волн?
- При каком соотношении между длиной волны и размерами препятствия дифракция волн проявляется наиболее отчётливо?

λ **ЗВУК****ПРОДОЛЬНЫЕ****ПОПЕРЕЧНЫЕ****интерференция****СВОЙСТВА****дифракция**

Портал журнала
«Популярная механика»
<http://gotourl.ru/13726>

Портал журнала
«Наука и жизнь»
<http://gotourl.ru/13729>

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называют волнами.
- Упругие волны являются бегущими волнами, которые при распространении в пространстве переносят энергию без переноса вещества.
- Волны бывают продольными и поперечными.
- Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется длиной волны. Все волны распространяются с определённой скоростью.
- Звуковые волны — это продольные механические колебания, распространяющиеся в среде с частотой от 16 до 20 000 Гц. Скорость распространения звуковых волн в твёрдых телах и жидкостях значительно больше, чем в воздухе. Скорость звука возрастает с повышением температуры.
- Для всех волновых процессов характерны явления интерференции и дифракции.

ВОЛНЫ

длина волны

ПОДРОБНЕЕ...

Асламазов Л. Г., Варламов А. А. Удивительная физика. Вып. 63. / Л. Г. Асламазов. — М.: Наука, 1988. — (Библиотечка «Квант»).

Липсон Г. Великие эксперименты в физике. / Г. Липсон. — М.: Мир, 1978.

Перельман Я. И. Занимательная физика. Кн. 1. / Я. И. Перельман. — М.: Римис, 2009.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Замечено, что при приближении к берегу амплитуда колебаний морских волн увеличивается. Почему это происходит?
- Перед сражением, приложив ухо к земле, воины могли слышать топот копыт приближающейся вражеской конницы. Почему этот топот не был слышен в воздухе?
- Почему даже при чуть приоткрытой двери мы отчётливо слышим шум из коридора?
- Иногда пожилые слабослышащие люди при беседе прикладывают к уху руку. С чем это связано?



Глава 5

ЭЛЕКТРО- МАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ
- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
- ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

РАЗДЕЛ II



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применён к передаче сигналов на расстояния при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией.

А. С. Попов

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как осуществляется взаимодействие между заряженными частицами.
- В чём заключалась гипотеза Максвелла.
- Что собой представляет электромагнитная волна.
- Каковы главные следствия теории Максвелла.

ВСПОМНИТЕ:

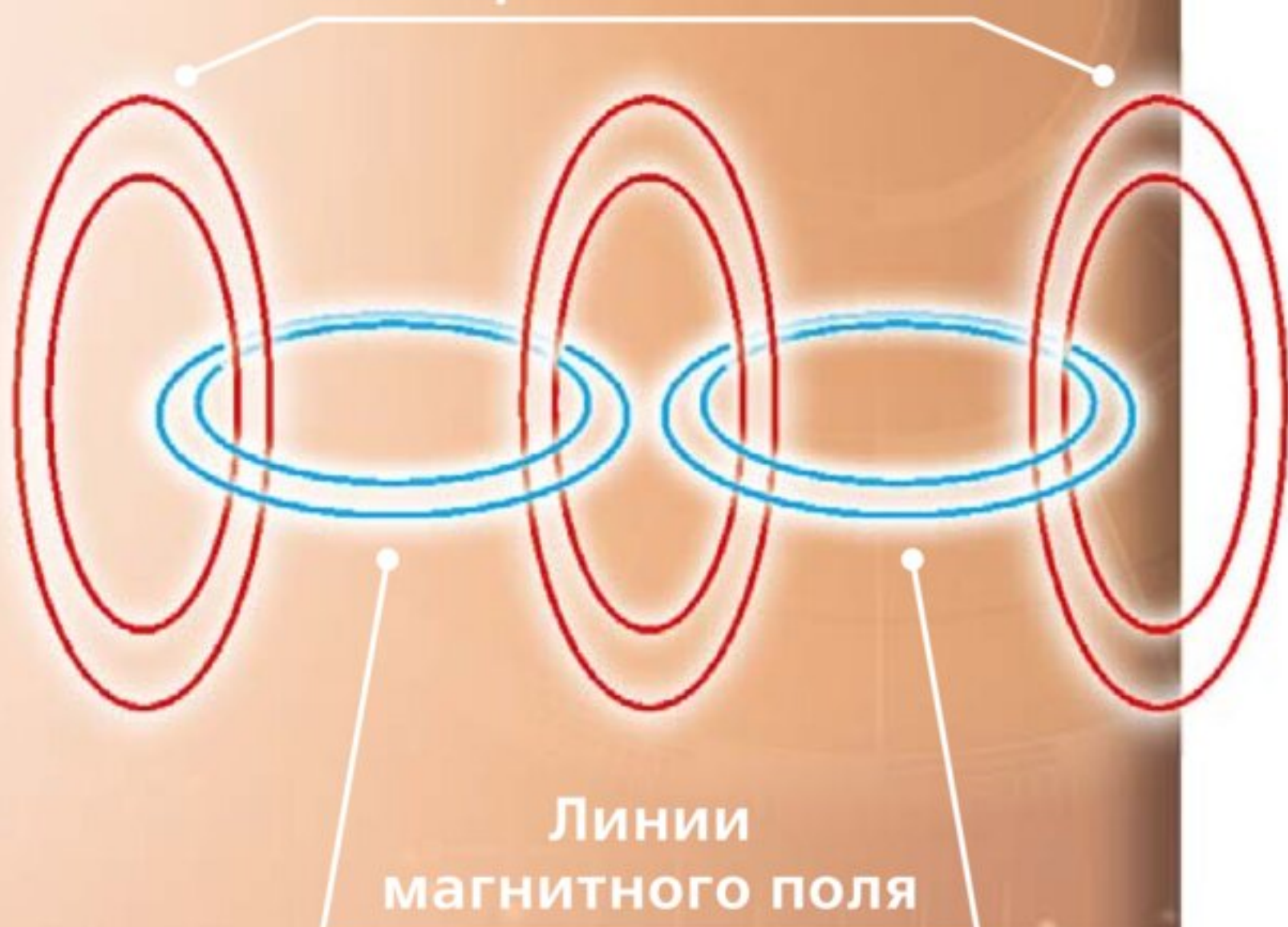
- Что такое напряжённость электрического поля?
- Что такое индукция магнитного поля?
- Какие волны называют поперечными?
- Каковы основные характеристики волны?



Джеймс Клерк Максвелл
(1831—1879)

Английский физик, создатель классической электродинамики, один из основателей статистической физики.

Линии вихревого
электрического поля



Линии
магнитного поля

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Многочисленные экспериментальные исследования электромагнитных колебаний показали, что изменения таких величин, как сила тока и напряжение, напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля, распространяются в электрических цепях с очень большой скоростью. Каким же образом электромагнитные возмущения передаются от одних участков цепи к другим?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГИПОТЕЗА**МАКСВЕЛЛА**

Чтобы ответить на поставленный вопрос, рассмотрим взаимодействие двух заряженных частиц, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Что произойдёт в случае, если какая-либо из частиц сместится из одной точки пространства в другую?

Очевидно, изменение положения заряда приведёт к изменению электрического поля вблизи него. Изменение во времени электрического поля вызовет появление в пространстве переменного магнитного поля. Изменяющееся магнитное поле породит вихревое (индукционное) электрическое поле и т. д. К таким выводам пришёл английский физик Дж. Максвелл, создатель единой теории электрических и магнитных явлений.

Главная идея Максвелла состояла в том, что между электрическими и магнитными полями существует тесная взаимосвязь: изменяющееся электрическое поле всегда порождает связанное с ним магнитное поле, а изменяющееся магнитное поле порождает связанное с ним электрическое поле, что подтверждается явлением электромагнитной индукции.

Максвелл показал теоретически, что изменения сцепленных электрического и магнитного полей не могут быть локализованы в пространстве, а **распространяются со скоростью, равной скорости света**. Поэтому возмущение электромагнитного поля, возникшее при перемещении одного из зарядов, достигнет второго заряда спустя короткое, но конечное время. В результате сила, действующая на второй заряд со стороны первого, изменится.

Следуя рассуждениям Максвелла, можно также понять, что произойдёт в случае, если заряженная частица не просто сместится из одной точки пространства в другую, а будет совершать колебания относительно некоторого начального положения. Если эти колебания будут периодическими, то электрическое поле вблизи заряда также начнёт периодически изменяться. Это приведёт к возникновению периодически изменяющегося магнитного поля, которое породит периодическое вихревое электрическое поле и т. д.

Согласно гипотезе Максвелла возникший при ускоренном движении заряженной частицы процесс изменения электромагнитного поля завершается в итоге

«отрывом» поля от самого заряда. Это поле, которое распространяется в пространстве и изменяется с течением времени, представляет собой **электромагнитную волну**.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ Возможность существования новой физической реальности — электромагнитных волн — было главным следствием теории Максвелла.

Согласно этой теории в электромагнитной волне вектор напряжённости $\vec{E}$ электрического поля и вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Именно эти физические величины являются основными характеристиками электромагнитной волны и испытывают периодические изменения. При этом модули векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ одновременно достигают максимальных и минимальных значений, т.е. колеблются в одной фазе.

Поскольку направление распространения электромагнитной волны перпендикулярно направлениям колебаний векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$, то электромагнитные волны являются *поперечными*. Взаимная ориентация этих векторов и вектора скорости $\vec{v}$ электромагнитной волны определяется правилом правого буравчика: если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением вектора скорости волны.

Максвелл также обосновал возможность распространения электромагнитных волн не только вдоль проводников с током, но и в пространстве, где нет зарядов.

Другой важный вывод теории Максвелла касался того факта, что скорость электромагнитной волны в вакууме оказалась равной скорости света $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с, о чём уже упоминалось выше.

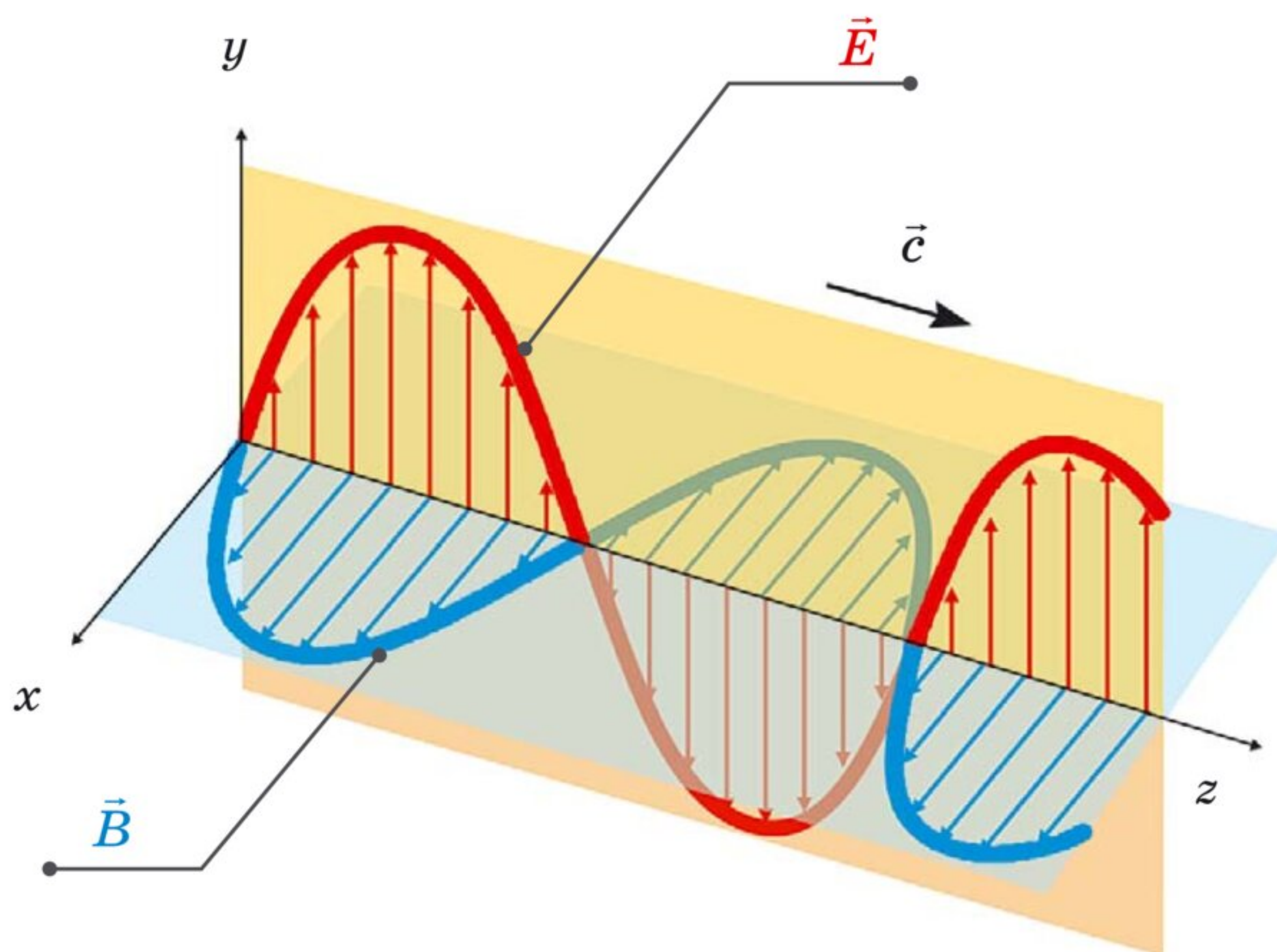
Этот результат позволил учёному высказать гипотезу о том, что свет представляет собой электромагнитную волну. Ранее никто из исследователей не связывал световые явления с явлениями электромагнетизма.

Для электромагнитных волн связь между длиной волны λ , частотой колебаний ν и скоростью распространения c в вакууме определяется такой же формулой, как и для механических волн:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Вряд ли мы сможем избежать заключения, что свет — это поперечные волнообразные движения той же среды, которая вызывает электрические и магнитные явления.

Дж. Максвелл



Если обозначить величины: частота колебаний — ν , скорость распространения электромагнитной волны — c , то длину электромагнитной волны вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

ВОПРОСЫ:

- При каких условиях заряженные частицы становятся источниками электромагнитных волн?
- Как ориентированы по отношению друг к другу векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{c}$ в электромагнитной волне?
- На основании чего Максвелл высказал гипотезу об электромагнитной природе света?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- При каких условиях излучаются электромагнитные волны.
- Что такое вибратор Герца и как он устроен.
- В чём заключалась главная цель опытов Герца.
- Какие выводы сделал Герц на основе результатов своих опытов.

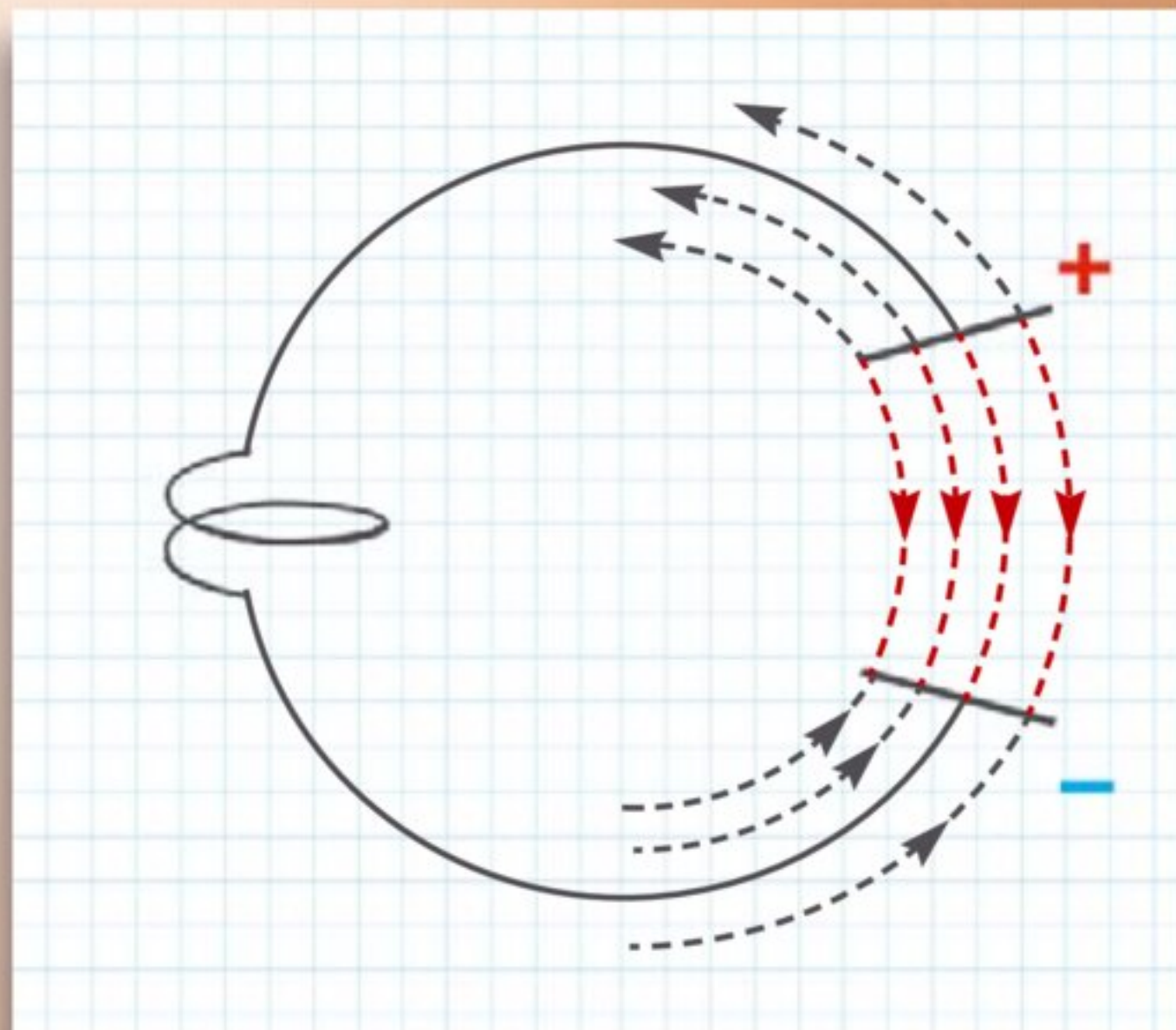
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электромагнитные колебания и как они осуществляются?
- Что такое электромагнитные волны?
- Каковы основные характеристики волны?



Генрих Рудольф Герц
(1857—1894)

Выдающийся немецкий физик. Его работы сыграли огромную роль в развитии науки и техники и положили начало изобретению беспроводного телеграфа, радио и телевидения.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Далеко не все современники Максвелла признали справедливость его теории и поверили в реальность существования электромагнитных волн. Как известно, любая научная теория требует своего опытного подтверждения. Поэтому были предприняты многочисленные эксперименты, результаты которых в итоге полностью подтвердили основные положения электромагнитной теории.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН Как показывают опыты по наблюдению явления электромагнитной индукции, чем быстрее с течением времени изменяется индукция магнитного поля, тем большее значение ЭДС индукции возникает в контуре и тем больше будет напряжённость вихревого электрического поля. С другой стороны, в силу принципа единства электрических и магнитных явлений можно утверждать, что, чем быстрее изменяется напряжённость электрического поля, тем больше индукция возникающего магнитного поля.

Поскольку интенсивность электромагнитной волны зависит от модулей векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$, для получения электромагнитных волн достаточно большой интенсивности необходимо заряженные частицы привести в колебательное движение высокой частоты. В этом случае напряжённость $\vec{E}$ электрического поля и индукция $\vec{B}$ магнитного поля будут изменяться с такой же частотой.

Как известно, электромагнитные колебания высокой частоты могут быть получены с помощью колебательного контура. Однако обычный колебательный контур практически не излучает электромагнитные волны. В таком контуре (его обычно называют закрытым) магнитное поле почти полностью сосредоточено внутри катушки, а электрическое — между обкладками конденсатора.

Это хорошо понимал немецкий физик Г. Герц, который для получения электромагнитных волн использовал устройство, названное впоследствии **вибратором Герца**. По существу, вибратор Герца представлял собой *открытый колебательный контур*, который можно получить из закрытого, постепенно увеличивая расстояние между обкладками конденсатора и одновременно уменьшая их площадь. В предельном случае контур превращается в катушку с двумя проводами на её концах. В реальных опытах катушка вообще заменялась куском провода.

В таком открытом контуре, представляющем собой обычный прямой провод, заряды не сосредоточены только на его концах, а распределены по всему проводнику. При направленном движении зарядов электромагнитное поле создаётся всей совокупностью зарядов и охватывает всё пространство вокруг проводника.

ОПЫТЫ ГЕРЦА Герц, будучи современником Максвелла, отнюдь не являлся сторонником его теории. Напротив, Герц придерживался точки зрения, согласно которой электрические и магнитные взаимодействия передаются от одной точки пространства к другой мгновенно, без всяких «посредников» в виде электромагнитных волн (теория дальнего действия). Поэтому главной целью опытов Герца было не доказать, а скорее опровергнуть основные положения теории Максвелла.

В опытах, осуществлённых Герцем в 1887 г., колебательное движение заряженных частиц осуществлялось с помощью разрядника (вибратора), состоящего из двух металлических стержней с шариками на концах.

Шарикам сообщались большие разноимённые заряды, в результате чего между ними возникала высокая разность потенциалов. Когда разность потенциалов превышала некоторое предельное значение (напряжение пробоя), между шариками происходил электрический разряд. При этом цепь замыкалась и в самих стержнях возникали электромагнитные колебания.

Поскольку эти колебания были затухающими, после их прекращения оба проводника вновь заряжались от источника до напряжения, при котором происходил очередной пробой воздушного промежутка между проводниками.

Приёмное устройство, с помощью которого Герц регистрировал электромагнитные волны, представляло собой такой же вибратор, состоящий из проволочного витка с двумя шариками на концах.

Под действием поля электромагнитной волны в приёмном контуре возбуждались колебания зарядов, т. е. переменный ток.

При совпадении частоты электромагнитной волны с собственной частотой приёмного контура в нём возникал резонанс, и амплитуда колебаний тока достигала своего наибольшего значения. В результате в узком воздушном промежутке между шариками приёмного вибратора наблюдались слабые разряды.

Таким образом, опыты Герца убедительно доказали факт существования электромагнитных волн. Кроме того, осуществив отражение электромагнитных волн от металлического листа, Герцу удалось определить длину волны λ .

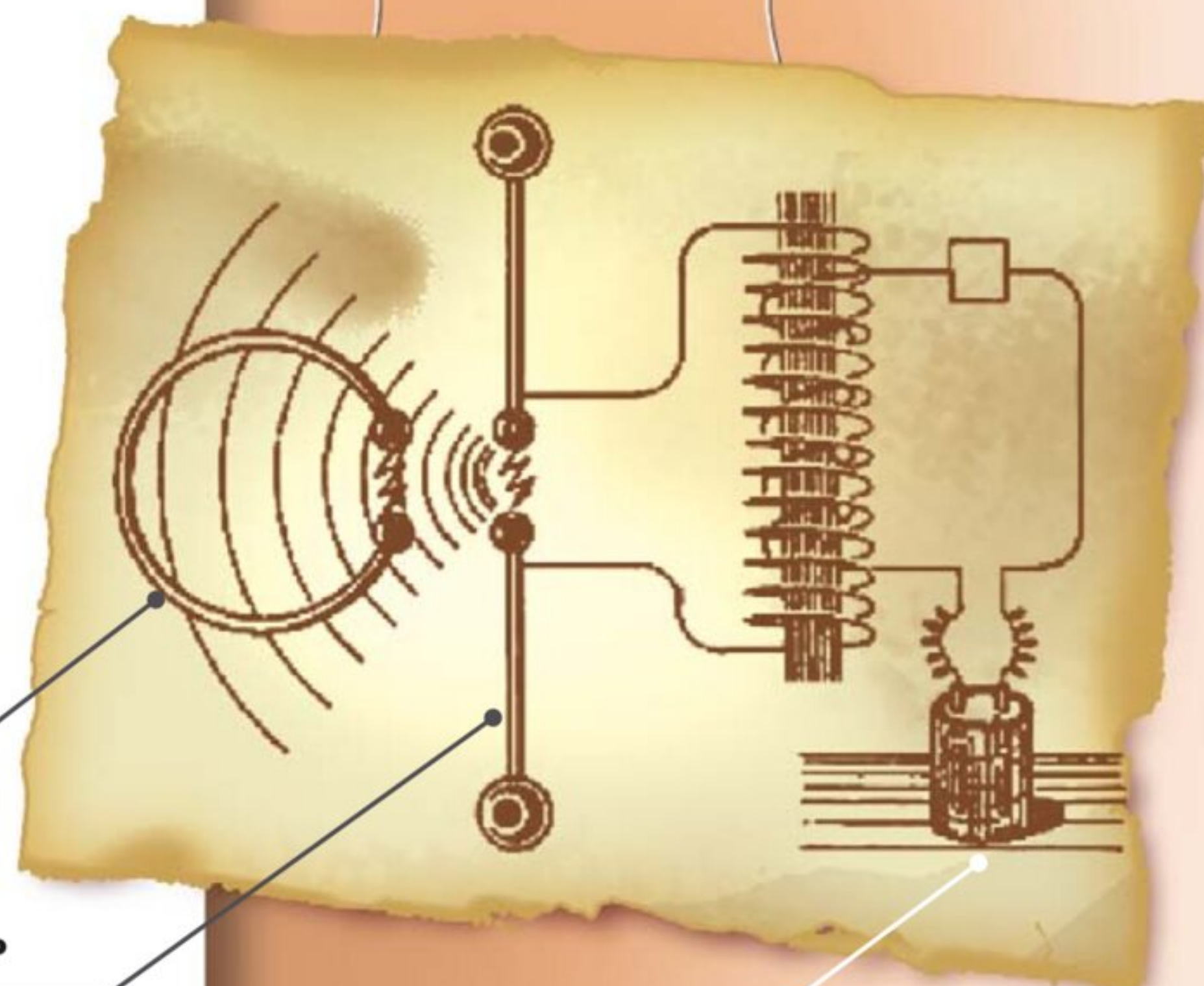
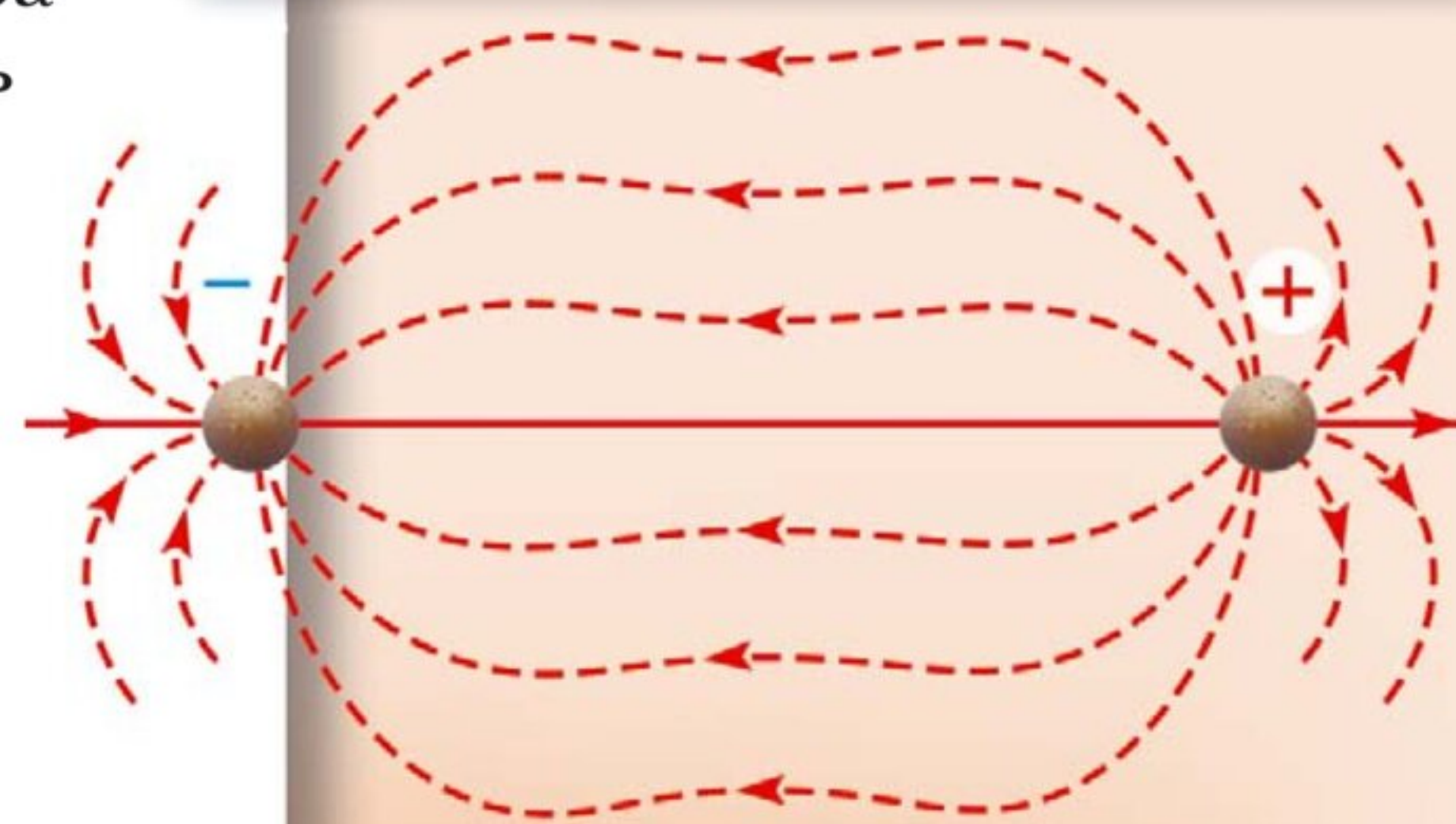
Вычислив собственную частоту колебаний ν вибратора и используя формулу $\nu = \lambda\nu$, Герц определил скорость электромагнитной волны. Она оказалась равной скорости света:

$$\nu = c = 300\,000 \text{ км/с.}$$

Следовательно, опыты Герца полностью подтвердили основные положения теории Максвелла.

Описанные эксперименты, как, по крайней мере, кажется мне, устраняют сомнения в тождественности света, теплового излучения и электродинамического волнового движения.

Г. Герц



Вибратор-приёмник

Вибратор-излучатель

Индукционная катушка

ВОПРОСЫ:

- Почему обычный колебательный контур непригоден для излучения и регистрации электромагнитных волн?
- Что такое открытый колебательный контур?
- Что удалось сделать Герцу: подтвердить или опровергнуть теорию Максвелла?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что собой представлял первый радиопередатчик.
- Что такое амплитудная модуляция высокочастотных колебаний.
- Что такое детектирование модулированных колебаний.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое открытый колебательный контур?
- Почему радиосвязь может осуществляться только на основе высокочастотных колебаний?



**Александр Степанович
Попов**

(1859—1905)

Выдающийся русский учёный,
изобретатель радио.

ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Опыты Герца были повторены и усовершенствованы другими исследователями, что послужило толчком к изучению новых возможностей передачи и приёма электромагнитных волн. Достижения в этой области, полученные в самом конце XIX и начале XX в., явились основой появления целого ряда средств связи, без которых немыслима наша сегодняшняя жизнь.

ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО Изобретателем радио мы по праву считаем русского учёного А. С. Попова, который в 1894 г. сконструировал прибор, регистрирующий электромагнитные волны, возникающие при грозовых разрядах. Этот прибор, по существу, являлся первым в истории радиоприёмником. Спустя год Попов при помощи созданных им генератора и приёмника передал первую в мире радиограмму на расстояние 250 м. Радиограмма содержала всего два слова: «Генрих Герц».

Почти одновременно с Поповым итальянский физик Г. Маркони создал свою радиотелеграфную установку и в 1897 г. получил на неё патент. При финансовой поддержке английского адмиралтейства Маркони в 1901 г. осуществил первую в истории передачу радиосигналов через Атлантический океан.

Передатчик Попова состоял из открытого колебательного контура, образуемого катушкой индуктивности L , которая посредством ключа K подключалась к батарее B , а также ёмкости C — искрового промежутка δ , включённого в разрыв антенны A . При замыкании ключа в антенне возникали электромагнитные колебания. Антенна становилась источником электромагнитных волн, которые, достигнув антенны приёмной станции, возбуждали в ней электрические колебания.

Для регистрации принятых волн А. С. Попов в своём приёмнике применил специальное устройство — **когерер**, состоящий из стеклянной трубки, в которую насыпаны металлические опилки. Из-за неплотной упаковки опилок сопротивление когерера велико, однако под действием электрических колебаний между опилками проскакивали слабые разряды, опилки слипались, и сопротивление когерера резко падало. При встряхивании трубки опилки распадались и их сопротивление снова возрастало. Для обеспечения автоматического приёма

электромагнитной волны использовался звонок. Чувствительное реле замыкало цепь звонка в момент прихода волны. Одновременно с сигналом о приходе волны молоточек звонка ударял по когереру, его сопротивление резко увеличивалось, и реле размыкало цепь звонка.



АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ Звуковые колебания имеют сравнительно низкие частоты. Электромагнитные колебания, имеющие такие же частоты, как и звуковые, практически невозможно передать на расстояние. Поэтому для передачи звука амплитуду высокочастотных колебаний изменяют или, иначе говоря, *модулируют* со звуковой частотой.

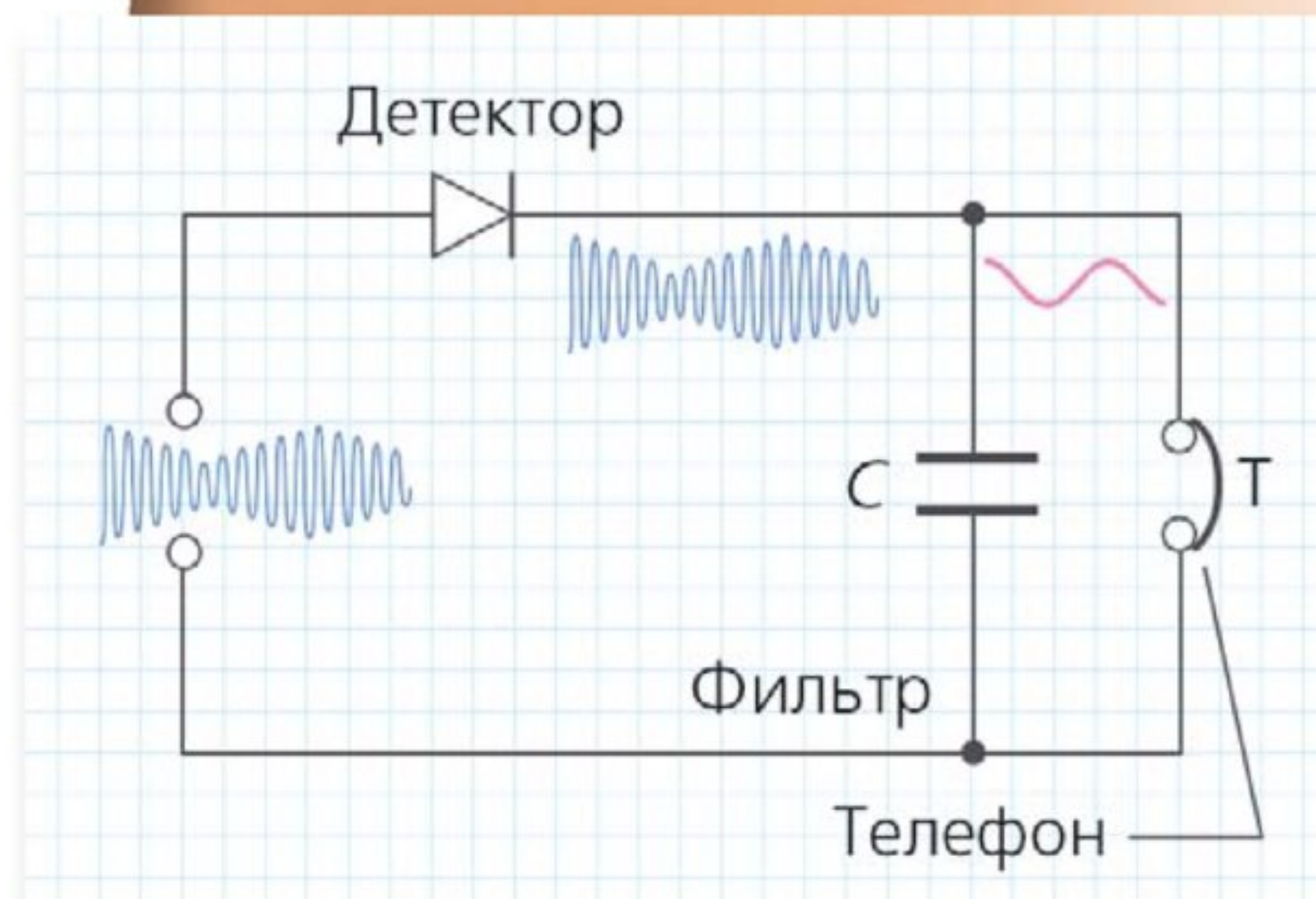
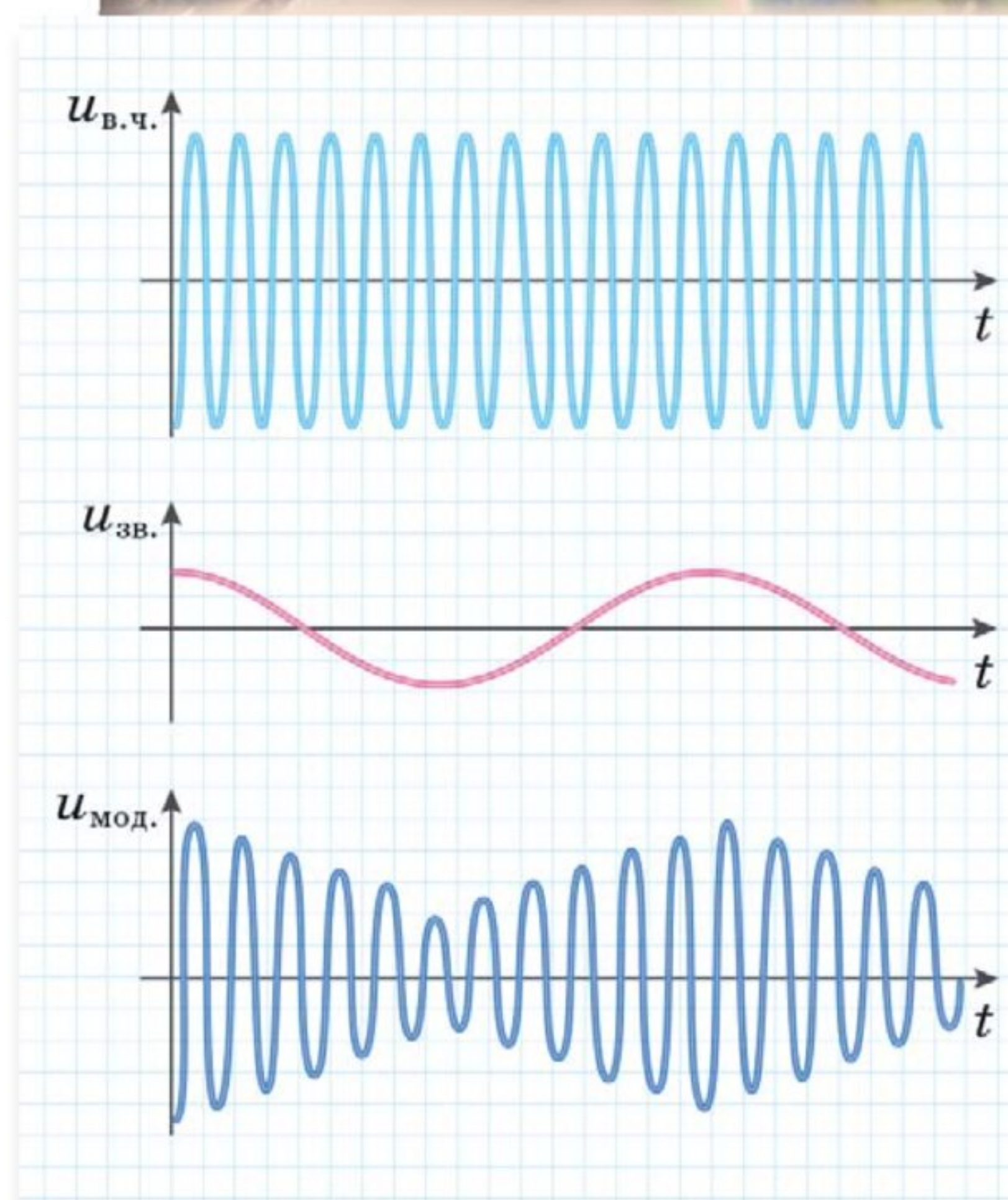
В качестве модулирующего устройства обычно используют источник переменного напряжения низкой частоты, который включается последовательно с источником генератора высокочастотных колебаний. Например, источником низкочастотных колебаний может быть одна из обмоток трансформатора при условии, что по другой его обмотке пропускается переменный ток звуковой частоты, образующийся в цепи микрофона в результате колебаний мембраны. Этот ток изменяет амплитуду несущих высокочастотных колебаний в соответствии с амплитудой звуковых колебаний.



Модулированный сигнал при помощи передающей антенны излучается в окружающее пространство и улавливается антенной приёмного устройства, частота которого настроена на частоту передающей станции.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ Следует подчеркнуть, что принятый приёмником модулированный высокочастотный сигнал не может непосредственно вызвать колебания мембраны громкоговорителя со звуковой частотой. Поэтому, прежде чем электромагнитные колебания возникнут в цепи телефона или громкоговорителя, необходимо предварительно из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты. Такой процесс преобразования частотных характеристик сигнала называют **детектированием** или **демодуляцией**.

Для детектирования используют устройства, имеющие в своём составе элемент, обладающий односторонней проводимостью. К таким элементам, называемым **детекторами**, относятся, например, вакуумный и полупроводниковый диоды. При включении полупроводникового диода последовательно с источником модулированных колебаний в цепи будет течь пульсирующий ток в одном направлении. Для дополнительного сглаживания тока в соответствии со звуковой частотой используют фильтр, представляющий собой конденсатор, подключаемый непосредственно к нагрузке (телефон, громкоговоритель).



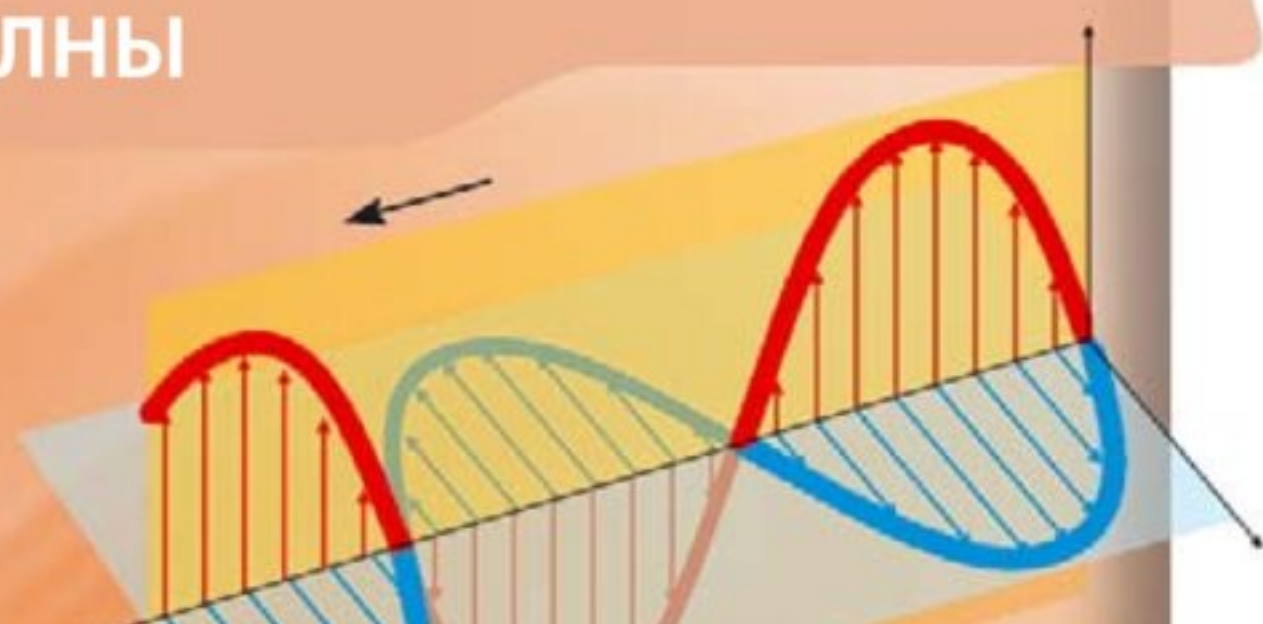
ВОПРОСЫ:

- Почему электромагнитные колебания звуковой частоты невозможно использовать в целях радиопередачи?
- На каком физическом принципе основана амплитудная модуляция?
- Что такое детектор и какова его роль в процессе демодуляции высокочастотных колебаний?
- Как соотносятся собственная частота приёмного контура и частота принимаемой электромагнитной волны?



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ



ГЕНЕРАТОР
ВЫСОКОЙ
ЧАСТОТЫ

МОДУЛИРУЮЩЕЕ
УСТРОЙСТВО

МИКРОФОН

ПЕРЕДАЮЩАЯ
АНТЕНА

ПРИЁМНАЯ
АНТЕНА

ПРИЁМНЫЙ
КОНТУР
И ДЕТЕКТОР

ГРОМКО-
ГОВОРИТЕЛЬ

ПРИНЦИП
РАДИОСВЯЗИ

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Процесс распространения переменного электромагнитного поля, порождённого колеблющимся зарядом, представляет собой электромагнитную волну.
- В электромагнитной волне вектор напряжённости $\vec{E}$ электрического поля и вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Эти физические величины являются основными характеристиками электромагнитной волны и испытывают периодические изменения.
- Электромагнитные волны являются поперечными.
- В вакууме скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света.
- Впервые электромагнитные волны получил Г. Герц и тем самым подтвердил основные положения теории Максвелла.
- Электромагнитные волны используют для радиопередачи.

ПОДРОБНЕЕ...

Большая книга экспериментов для школьников. — М.: Росмэн, 2001.

Суорц К.Л. Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 2. / К.Л. Э. Суорц. — М.: Наука, 1987.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2001.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Будет ли осуществляться приём радиоволн, если антенну установить на чердаке под железной крышей?
- Почему затруднена радиосвязь на коротких волнах в горной местности?
- Увеличение дальности радиосвязи с космическим кораблём в 2 раза потребовало увеличения мощности радиопередатчика в 4 раза. С чем это связано?
- Замкнутый колебательный контур сделали открытым. В каком случае свободные электромагнитные колебания затухают быстрее?

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Вся физика. Физический
энциклопедический словарь
<http://gotourl.ru/13730>



СВЕТ И ЦВЕТ



Исследования света и цвета занимают особое место в истории физики. И это неудивительно, ведь через органы зрения человек познаёт большую часть окружающего мира, его многообразие и его тайны. Учёные считают, что более 80% информации из окружающего мира мы получаем с помощью глаз.

Но история изучения света имеет ещё одну сторону медали, которая на многие столетия определила отношения исследователей и общества к этой научной проблеме. Дело в том, что с глубокой древности люди обожествляли Солнце и другие светила. В самых первых строчках Священного Писания есть слова: «Да будет свет!» Фактически через изучение света и оптических явлений многие века проводилась грань между научным и религиозным мировоззрением. Традиционно, говоря об истории развития оптики, начинают с эпохи Античности и мыслителей Древней Греции. Однако археологические находки свидетельствуют о том, что знания об оптических явлениях были присущи гораздо более древним цивилизациям. Останки древних обсерваторий и храмов свидетельствуют о том, что в древности люди умели создавать удивительные «инструменты» для наблюдения за движением небесных светил. Самые древние линзы найдены при раскопках памятников культуры Древнего Египта, Вавилона и Крита, относящихся к 3-му тысячелетию до н. э.

Древние греки и, в частности Эмпедокл, размышляя о природе света, пришли к выводу о том, что прямолинейные лучи света испускаются глазом. По их представлениям, глаз, как прожектор, освещает различные предметы, делая их видимыми. Но существовали и другие точки зрения. Пифагор считал, что мы видим тела потому, что они испускают частицы, попадающие в глаза, а Аристотель полагал, что свет есть возбуждение среды, находящейся между объектом и глазом. Древние греки прекрасно владели геометрией, и именно они заложили известные нам основы геометрической оптики. В то же время в школе Платона были сформулированы два важнейших закона геометрической оптики: прямолинейность световых лучей и равенство углов их падения и отражения. В III в. до н. э. Евклид в трактатах по Оптике описывал возникновение изображений при отражении от зеркал. Именно Евклид написал первый труд по теории перспективы — правилам изображения предметов разных размеров, находящихся на различных расстояниях от наблюдателя.

Представления о световых лучах, испускаемых из глаз, просуществовали почти 15 веков. Огромный вклад в изменение этих представлений внёс в XI в. н. э. арабский учёный Абу Али аль-Хасан ибн аль-Хасан ибн аль-Хайсам аль-Басри, который в средневековой Европе стал известен по имени Альхазен (Alhazen). Он пришёл к выводу, что световые лучи приходят в наши глаза извне. Альхазен изучал законы отражения света, прохождение света через стекло, строение человеческого глаза. Свои исследования учёный базировал на многочисленных опытах.



Европейскую культуру с исследованиями Альхазена познакомил католический монах Френсис Бэкон. Он исследовал прохождение и отражение света через различные стёкла и зеркала и даже создал первые очки для улучшения зрения. Полученных в Средние века знаний было уже достаточно для создания первых микроскопов (микроскоп Гука) и увеличительной трубы (труба Галилея). Были открыты спутники Юпитера, проведены наблюдения за движением комет и звёзд. В конце концов геоцентрическая картина мира, в которой в центре находилась Земля, а вокруг неё — хрустальные сферы с закреплёнными на них звёздами, сменилась на гелиоцентрическую картину мира. В эту эпоху из астрономических наблюдений был сделан вывод, что скорость света хотя и очень велика, но конечна.

Оставалась нерешённой проблема о природе цвета. Этот вопрос решался в научном поединке Р. Декарта и И. Ньютона. Декарт построил некую механическую картину мира, в которой основным являлся белый цвет. По его теории, если пропустить белый цвет через стеклянную призму, то «частицы» белого цвета вращаются с разной скоростью, и возникают разные цвета. Но если цветной луч опять пройдёт через призму, он снова станет белым. Ньютон решил вопрос о природе цвета экспериментально. Он разложил с помощью призмы белый цвет в спектр, состоящий из различных цветов, а затем отделил только один цвет (красный) и снова пропустил его через призму. Красный луч света после прохождения через призму остался красным. Таким образом, Ньютон сделал революционный для физики вывод — основными цветами являются красный, синий и зелёный, а их комбинация образует белый цвет.

Во времена Ньютона господствовала корпускулярная теория света. Однако Т. Юнг, написавший трактат о звуковых колебаниях, высказал гипотезу, что свет есть волна с присущими волнам явлениями интерференции и дифракции. Получалось, что свет ведёт себя как объект, который обладает и корпускулярными, и волновыми свойствами. Если свет — волна, то наш глаз видит лишь ограниченный набор длин волн (или частот). Мы уже не видим волн, длина которых меньше, чем длина волны, характерная для фиолетового цвета (ультрафиолетовые волны), а также волн, длина которых больше характерной для красного цвета (инфракрасный свет). А в природе такие волны существуют. Окончательную точку в изучении волновой природы света в XIX в. поставил Дж. Максвелл, который показал, что по своей физической природе свет — это электромагнитная волна. Но на границе XIX—XX вв., изучая спектр излучения абсолютно чёрного тела, М. Планк показал, что свет — это электромагнитная волна, но при определённых условиях он излучается квантами (порциями), т. е. корпускулами (частицами). В 1905 г. А. Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах — квантах света, которые называют фотонами.

Таким образом, исследования природы света и цвета длиной в несколько тысяч лет привели к современным представлениям о двойственной корпускулярно-волновой природе света. Изучение света и цвета позволило сформировать научную картину мира от масштабов Вселенной до масштабов атомов и ядер.





Глава 6

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

- СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА
- ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА
- ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА
- ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО. ЛИНЗЫ
- ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
- ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ III



ОПТИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Как от воды иль зеркала углом
Отходит луч в противном на-
правленьи,
Причём с паденьем сходствует
подъём...

Данте

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое световой луч.
- Закон отражения света.
- Закон независимости распространения света.

ВСПОМНИТЕ:

- Каково условие применимости геометрической оптики?
- Когда мы видим предмет?

СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Представление о световых лучах возникло ещё в античной науке. Именно понятие светового луча легло в основу геометрической оптики. Световой луч — это модель, имеющая в виду бесконечно узкий пучок света.

ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА был сформулирован ещё Евклидом и гласит: *свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно*. Так же как и в воздухе, свет распространяется прямолинейно и в прозрачных твёрдых телах, и в жидкостях.

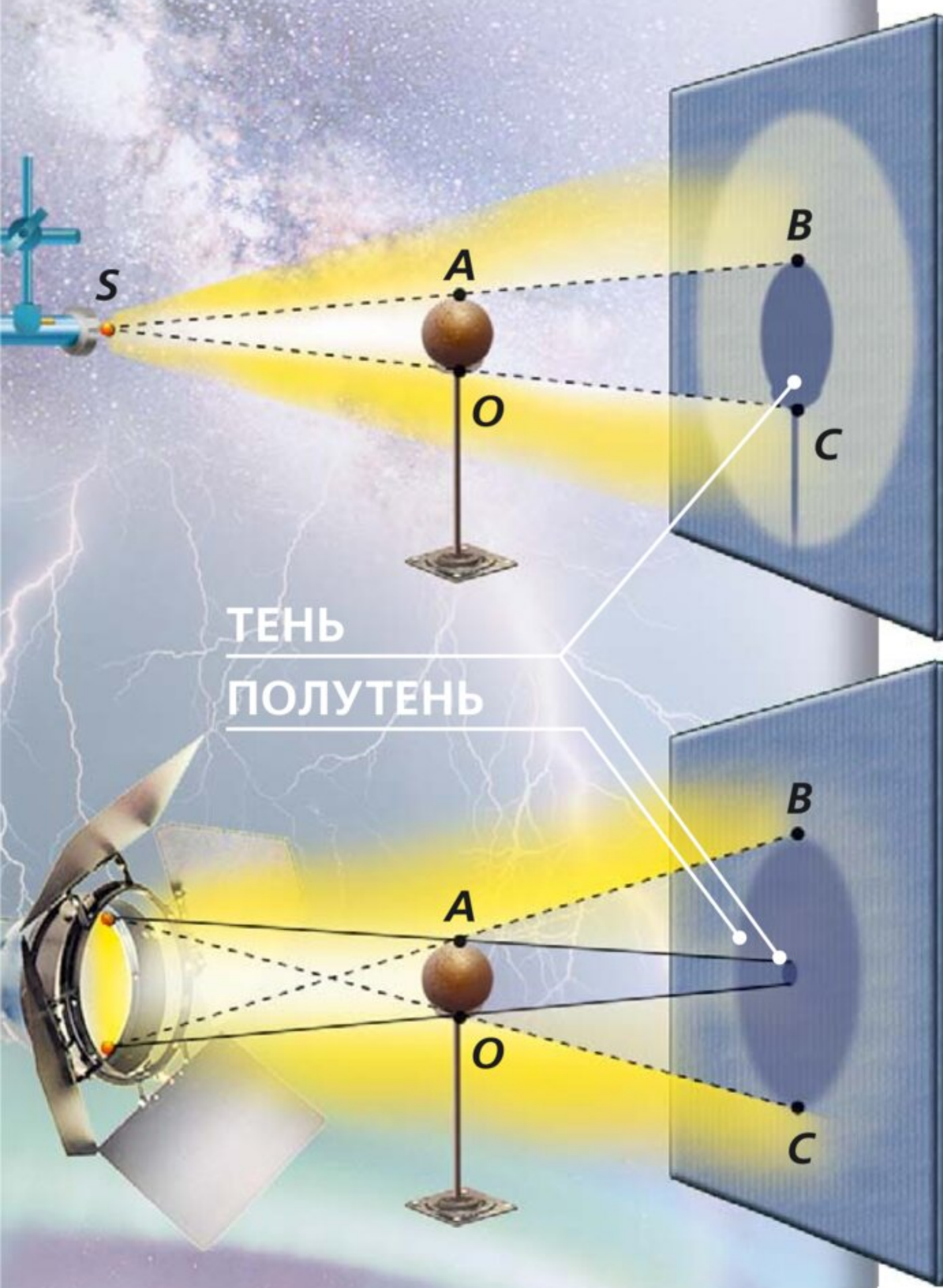
СВЕТОВОЙ ЛУЧ Понятие «световой луч» в геометрической оптике имеет геометрический смысл и понимается как линия, вдоль которой распространяется свет. Различают *математический* (геометрический) световой луч и *физический* световой луч. Физический световой луч — это световой пучок конечной ширины или, другими словами, достаточно узкий пучок света, который можно считать нерасходящимся. Геометрический световой луч можно рассматривать как ось светового пучка. Так как свет является излучением, а любое излучение переносит энергию, то можно сформулировать ещё одно определение: *световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком*.

Мы видим предмет тогда, когда нам в глаз попадает свет от каждой точки предмета. Хотя световые лучи выходят из каждой точки по всем направлениям, лишь узкий пучок этих лучей попадает в глаз наблюдателя. При изменении положения наблюдения в глаз попадает уже другой пучок лучей от каждой точки предмета.

ТЕНЬ И ПОЛУТЕНЬ Прямолинейным распространением света объясняется явление образования тени и полутени от предметов. **Тень** — это пространство, в которое не попадают лучи света от источника.

Чёткая тень получается только в том случае, когда размеры источника света много меньше расстояния от него до экрана. Такой источник света называют **точечным**. **Точечный источник света** — это источник света, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие.

Полутень — это пространство, в которое попадает свет от части источника света. В данном случае источник света состоит из множества точечных источников, каждый из которых испускает лучи. На экране появляются области, в которые свет от одних точек попадает, а от других нет. В этих областях образуется полутень. Часть области экрана оказывается совсем не освещена. Здесь образуется полная тень.



Закон прямолинейного распространения света позволяет объяснить, как возникают солнечные и лунные затмения.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА Тела, которые не являются источниками света, мы видим потому, что свет отражается от их поверхности, и человеческий глаз реагирует именно на этот отражённый свет. Представим себе обычную комнату, стены которой выкрашены идеально чёрной краской, совершенно не отражающей падающий на неё свет. В этом случае на всех предметах в комнате будут видны только участки, обращённые к окнам. Теневые стороны предметов станут невидимыми. Если бы земной шар не был окружён атмосферой, отражающей и рассеивающей солнечный свет, то можно было бы видеть одновременно Солнце и звёзды на совершенно чёрном небе. Белый потолок и светлые стены отражают и рассеивают значительную часть падающего на них света и благодаря этому увеличивают освещённость комнаты.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА упоминается ещё Эвклидом в знаменитом труде «Начала» наряду с основами геометрии, которая сегодня носит название «евклидова геометрия». **Закон отражения света** гласит:

- а) луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности, восстановленным в точке падения луча;
- б) угол падения равен углу отражения:

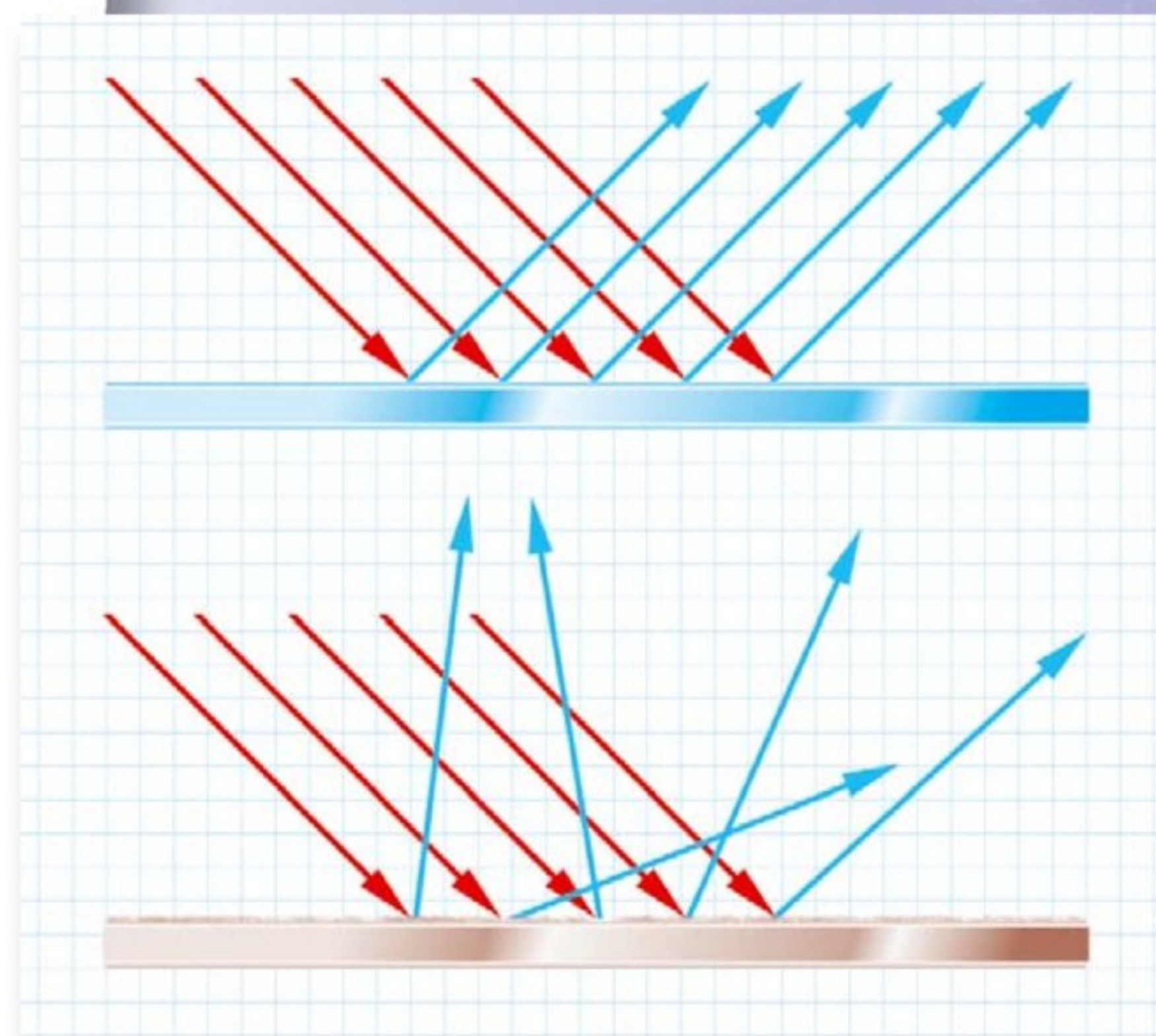
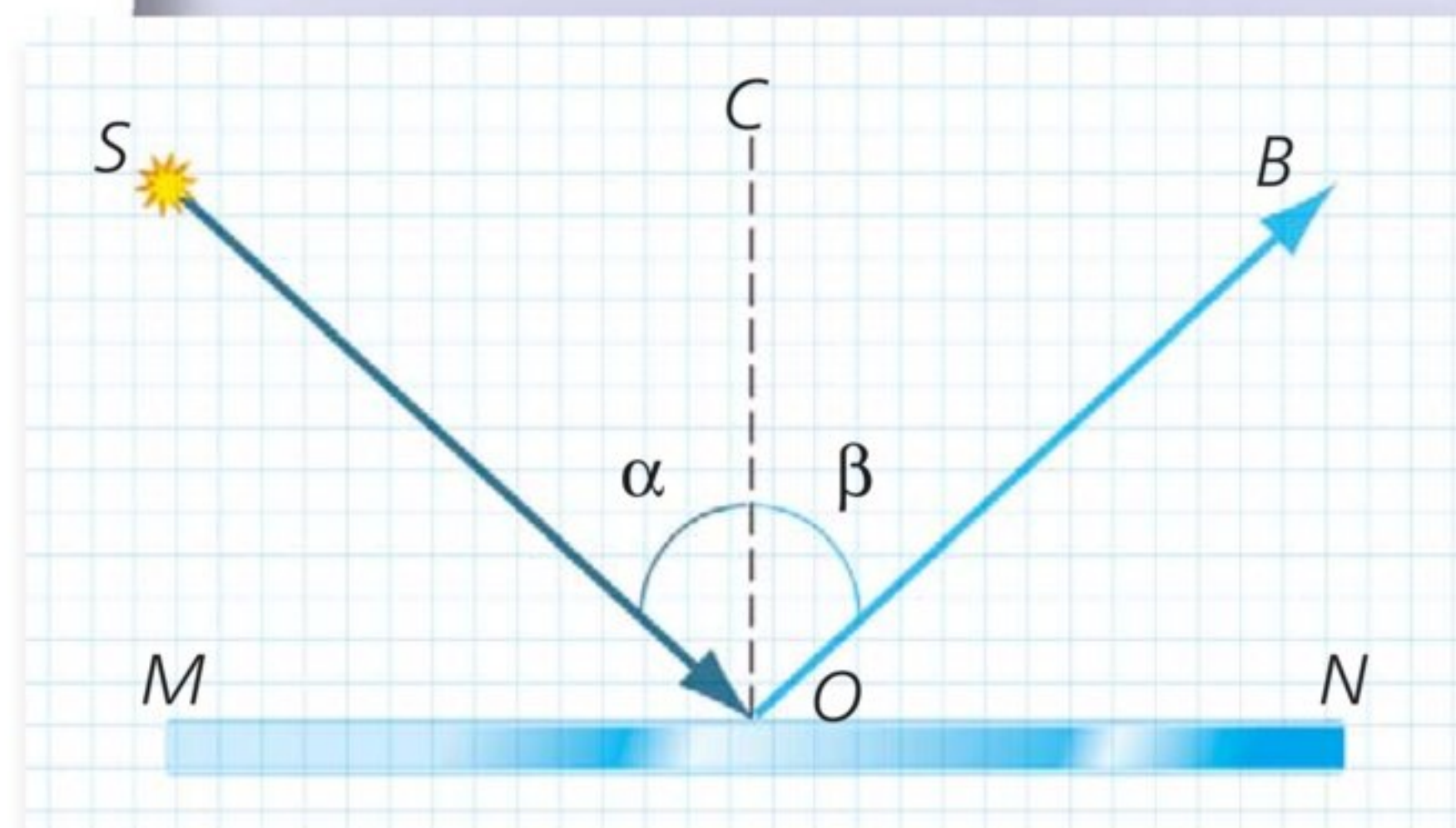
$$\angle \alpha = \angle \beta.$$

Из закона отражения света следует свойство световых лучей, которое называют **обратимостью световых лучей**. Это свойство легко проверить при помощи оптического диска: луч, идущий по пути отражённого луча, отражается затем по пути падающего.

ЗЕРКАЛЬНОЕ И РАССЕЯННОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА Если пучок параллельных световых лучей падает на гладкую плоскую поверхность, то отражённые лучи будут также параллельны друг другу. Такое отражение называют **зеркальным**. Если пучок параллельных лучей падает на шероховатую поверхность, то отражённые лучи уже не будут параллельными. Такое отражение света называют **рассеянным** (или диффузным).

ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА утверждает, что световые пучки, пересекаясь, не влияют друг на друга. Однако этот закон справедлив лишь для световых пучков небольшой интенсивности. Мощные пучки света, например лазерные, будут оказывать влияние друг на друга. Другими словами, для пучков света большой энергии закон независимости распространения света перестаёт быть справедливым.

Принцип действия ламп рассеянного света заключается в том, что скрытые от прямого зрения лампы освещают только потолок и часть стен, а уже эти поверхности освещают всю комнату отражённым или рассеянным светом.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

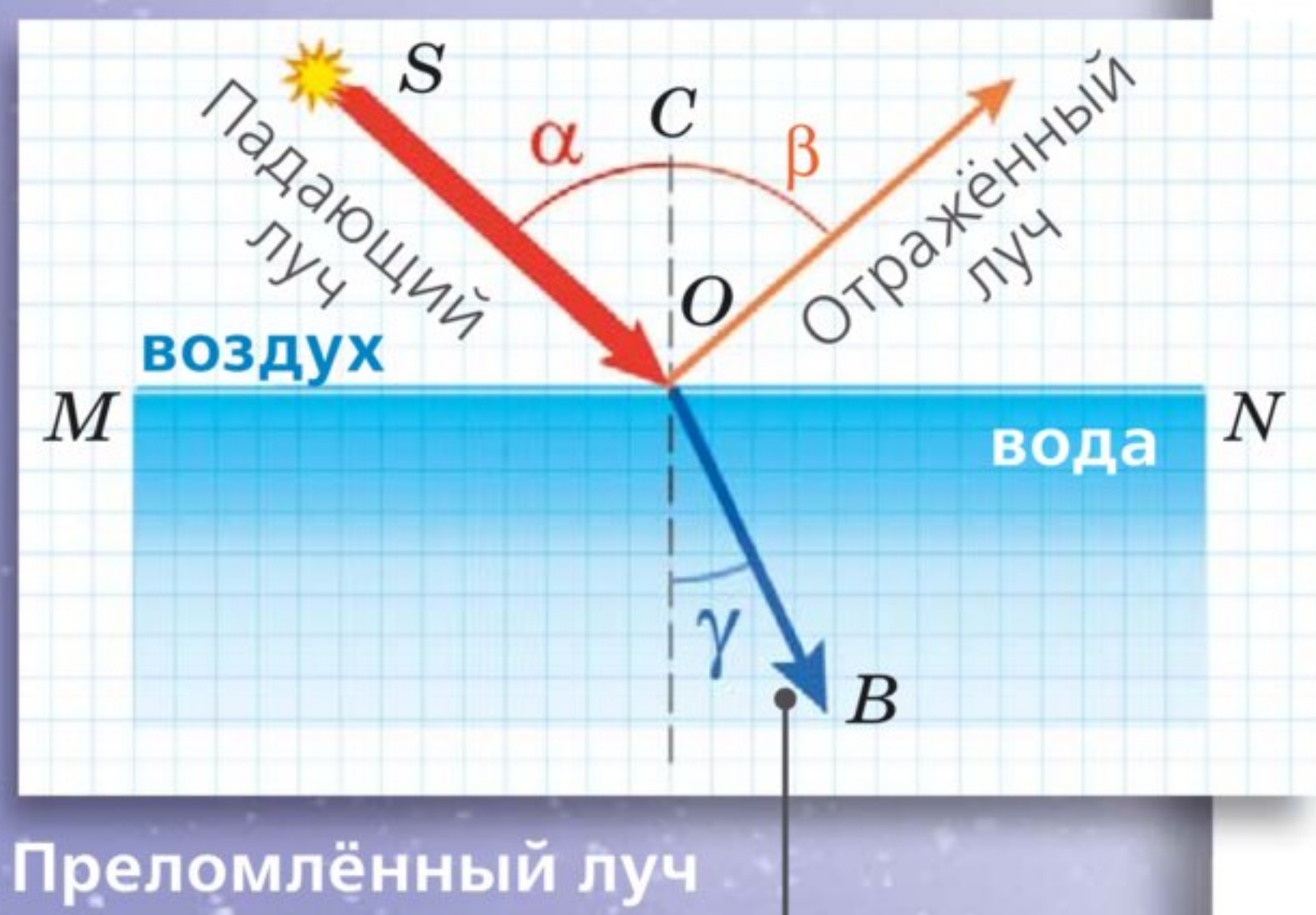
- Что такое световой луч?
- Сформулируйте закон отражения света.
- Что такое зеркальное и рассеянное отражение света?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Закон преломления света.
- Что такое оптическая плотность среды.
- Как ведёт себя световой луч при прохождении через плоскопараллельную пластину и треугольную призму.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон отражения света?

**ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА**

Когда мы смотрим через оконное стекло на ярко освещённый дневной пейзаж, мы практически не видим самого стекла. Если же мы смотрим через оконное стекло на улицу в сумерки, и при этом в комнате уже горит свет, мы одновременно видим и пейзаж за окном, и отражение в стекле комнаты и самого себя. Поведение света на границе раздела двух прозрачных сред описывается законом преломления света.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА Когда свет попадает на границу раздела двух сред, часть его отражается, а другая часть проникает в среду. **Преломление света** — это изменение направления распространения света при его переходе из одной среды в другую. Процесс преломления и отражения света зависит и от сред, и от угла падения луча.

Преломление света можно наблюдать при помощи оптического диска, в центре которого установлена стеклянная пластина. В этом случае световой луч проникает внутрь стекла и меняет направление своего распространения. Именно преломлением света объясняется возникновение кажущегося излома на трубочке, опущенной в стакан с водой.

Пусть на границу раздела двух сред падает луч. Угол падения α — это угол между **падающим лучом** и перпендикуляром к поверхности раздела двух сред в точке падения луча. Угол отражения β — это угол между **отражённым лучом** и перпендикуляром к поверхности раздела двух сред в точке падения луча. Угол преломления γ — это угол между **преломлённым лучом** и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча.

ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ СРЕДЫ Различие углов падения и преломления обусловлено тем, что скорость распространения света в различных средах различна. Говорят, что, чем больше скорость распространения света в среде, тем меньше её оптическая плотность. Например, оптическая плотность стекла больше, чем оптическая плотность воздуха, т. е. скорость распространения света в стекле меньше, чем в воздухе. Оптическая плотность воды также больше оптической плотности воздуха.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА Если луч света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения: $\alpha > \gamma$. Если луч света переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения: $\alpha < \gamma$. При изменении угла падения меняется и угол преломления.

Закон преломления света, называемый также законом Снелля в честь открывшего его голландского физика, гласит: **лучи падающий, преломлённый и перпендику-**

ляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

Величина n называется **относительным** показателем преломления для двух сред. Показатель преломления среды относительно вакуума называется **абсолютным** показателем преломления среды или просто показателем преломления среды. При этом показатель преломления вакуума принимается тождественно равным единице.

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ Абсолютный показатель преломления среды n_1 равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v_1 в данной среде:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}.$$

Относительный показатель преломления равен отношению скоростей света в тех средах, на границе между которыми происходит преломление:

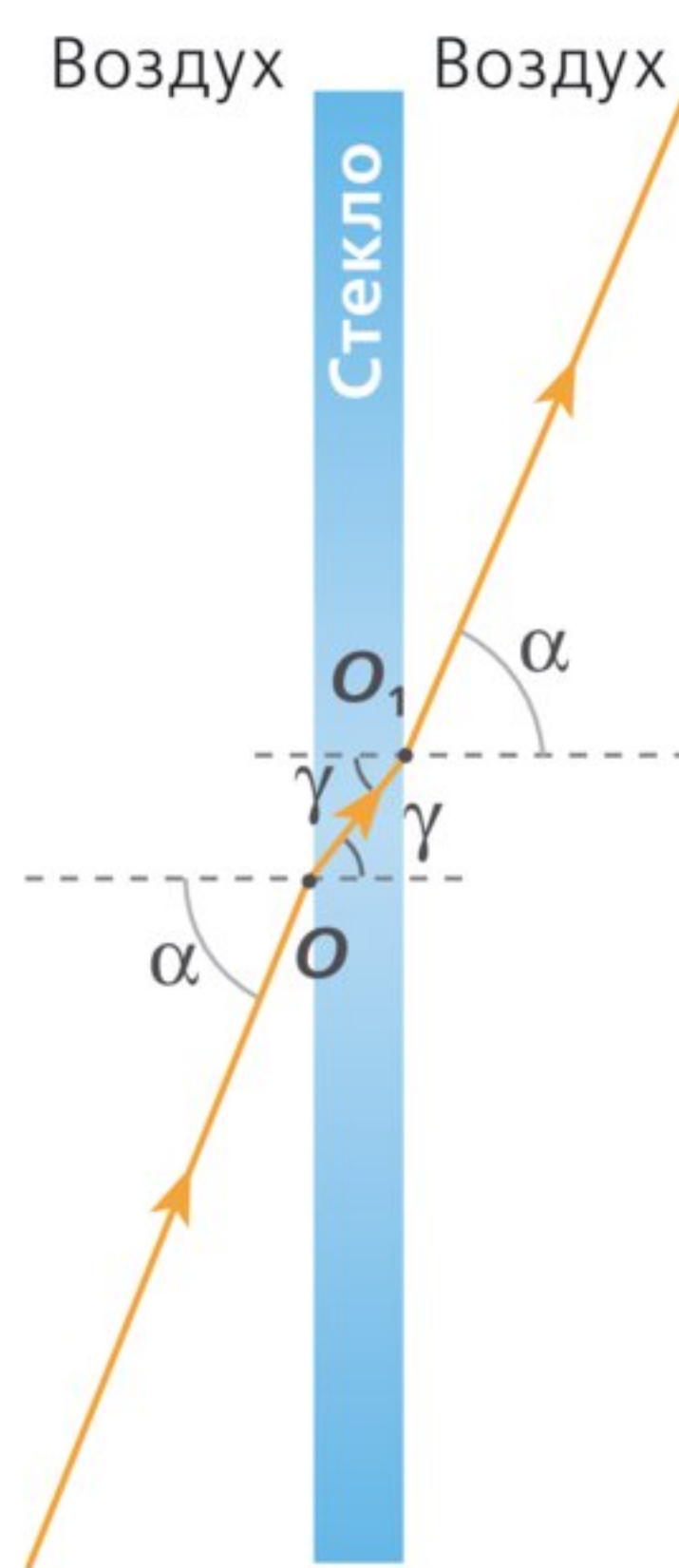
$$n = \frac{v_1}{v_2}.$$

ПРОХОЖДЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ СТЕКЛЯННУЮ ПЛАСТИНУ

Пусть свет падает на плоскую стеклянную пластину из воздуха в точку O под углом α . Обозначим угол преломления γ . Тогда угол падения луча OO_1 , проходящего внутри пластины в точку O_1 , тоже окажется равным γ , поскольку эти углы являются накрест лежащими. Это вам известно из курса геометрии про углы.

Тогда, по принципу обратимости световых лучей, угол преломления для луча, выходящего из пластины на воздух, равен α .

Таким образом, при прохождении через плоскопараллельную пластину направление луча не меняется, луч лишь смещается в сторону.

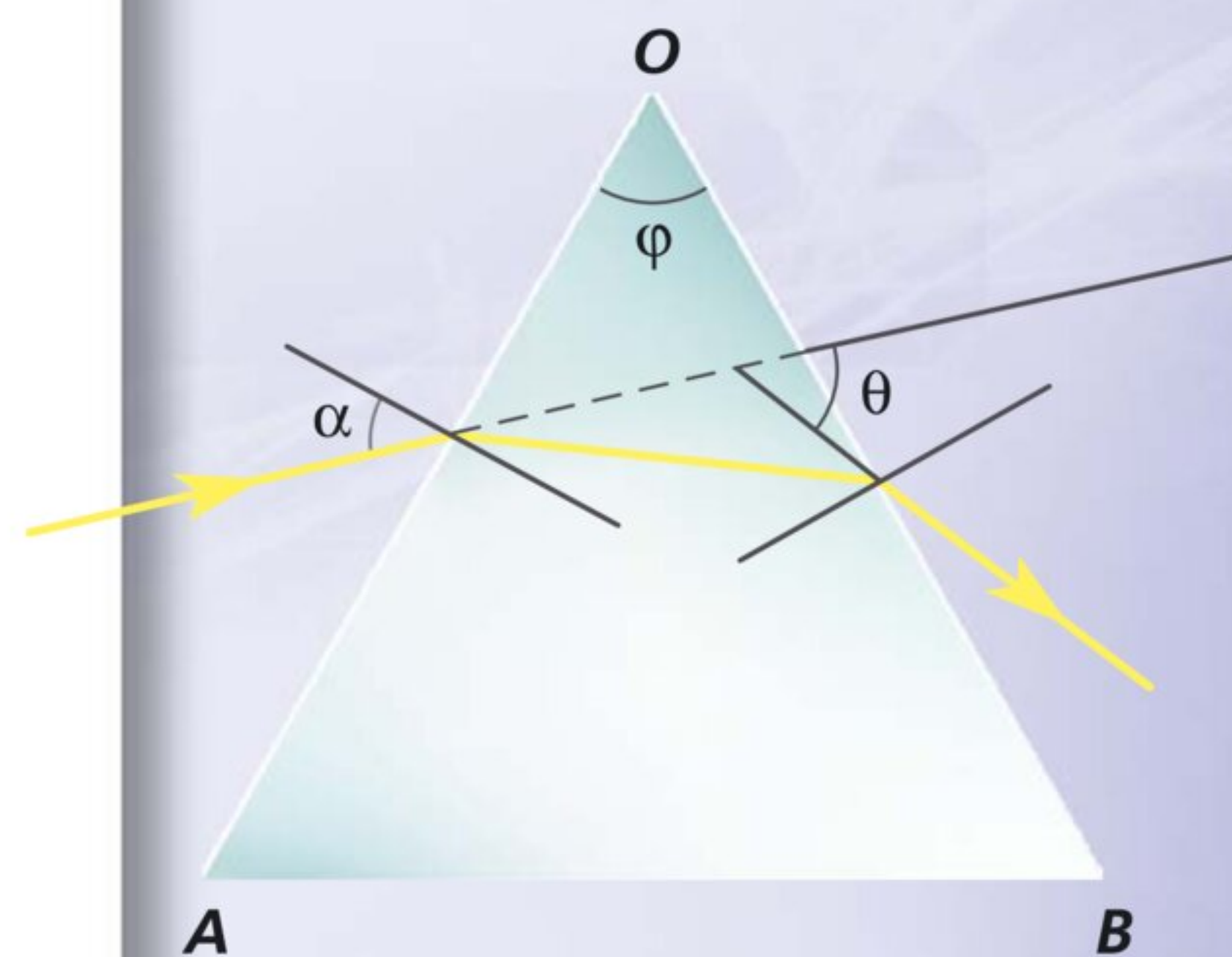


ПРОХОЖДЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ ТРЕУГОЛЬНУЮ ПРИЗМУ Луч, проходя сквозь треугольную призму, преломляется два раза — на гранях AO и OB . Угол φ между этими гранями называют **преломляющим углом призмы**. Угол отклонения луча θ зависит от показателя преломления материала, из которого сделана призма, от преломляющего угла призмы φ и от угла падения α .

Если свет переходит из среды **1** в среду **2**, то часто записывают относительный показатель n как n_{21} — относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Закон Снелля можно записать с использованием абсолютных показателей преломления среды **1** и среды **2**:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Световые лучи подчиняются **принципу обратимости**: если падающий луч пустить по направлению преломлённого луча, то полученный преломлённый луч пойдёт по направлению падающего.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое оптическая плотность среды?
- Сформулируйте закон преломления света.
- Что такое показатель преломления?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое полное внутреннее отражение света.
- Что такое волоконная оптика.

ВСПОМНИТЕ:

- Закон Снелля.
- Что такое оптическая плотность среды?

Найдём предельный угол для границы вода — воздух:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,33} = 0,75,$$

т.е. $\alpha_0 = 49^\circ$. Следовательно, если ныряльщик будет смотреть из-под воды сквозь гладкую поверхность бассейна, то он увидит внешний мир в границах круга, граница которого образует с вертикалью угол 49° . При больших углах ныряльщик увидит отражение стен, дна бассейна и тех тел, которые находятся внутри бассейна.

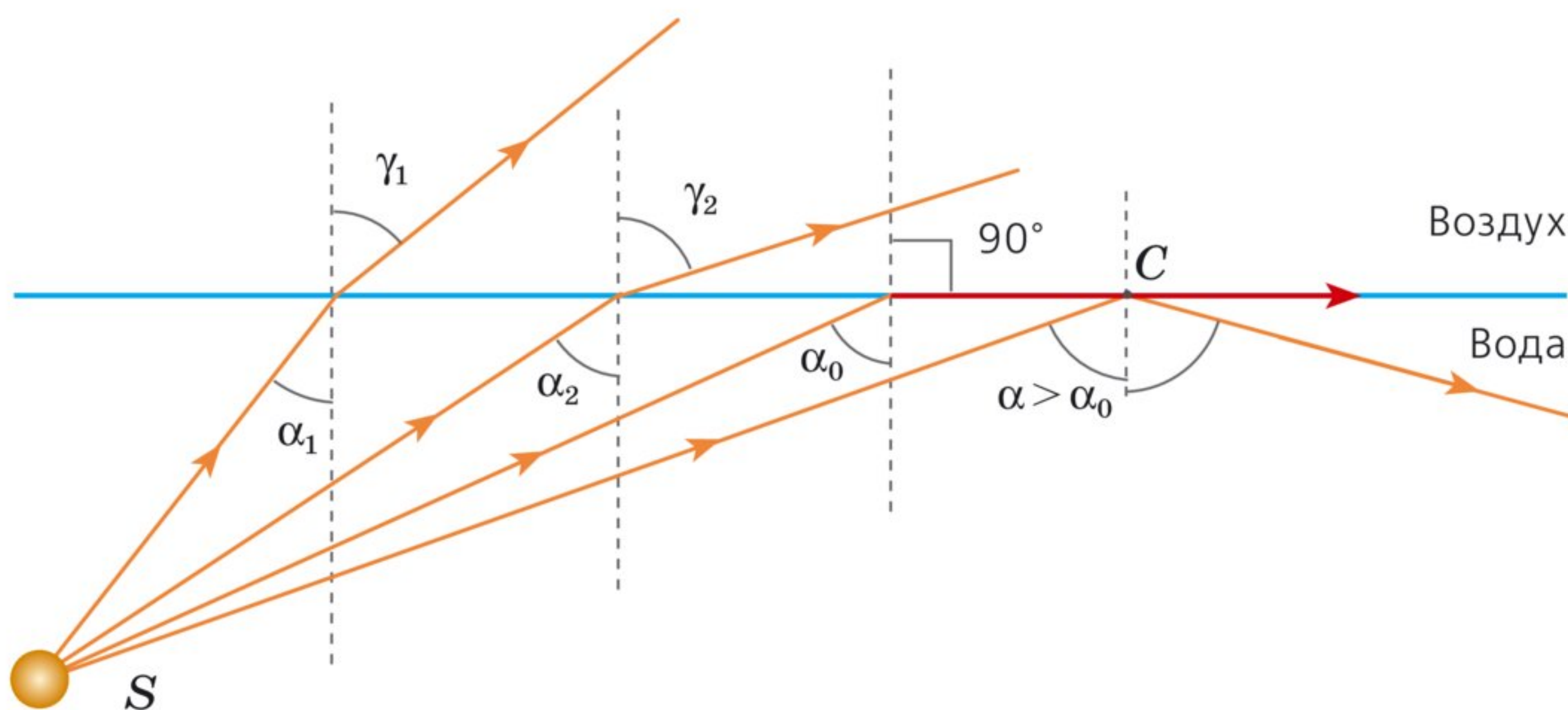
ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Когда свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, например из воды в воздух, то его угол преломления больше, чем угол падения. Как будет себя вести свет, когда угол преломления достигнет 90° ?

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА Рассмотрим ситуацию, когда свет переходит из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 , при этом $n_1 > n_2$. По закону Снелля

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Так как относительный показатель преломления двух сред — величина постоянная, то, чем больше угол падения, тем больше угол преломления. Таким образом, увеличивая угол падения, можно добиться ситуации, при которой угол преломления становится равным 90° и преломлённый луч начинает «скользить» вдоль границы раздела двух сред. Этот угол падения (α_0) называется *предельным углом*. Итак, при предельном угле падения угол преломления равен 90° .



Величину предельного угла можно найти из закона Снелля:

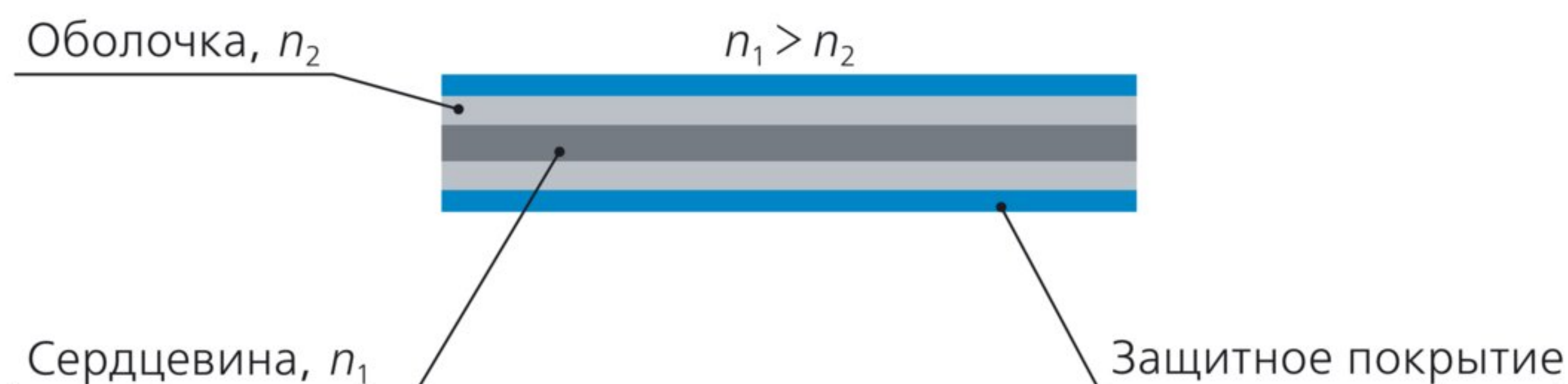
$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если угол падения превышает предельный угол (луч C), то согласно закону преломления $\sin \gamma$ должен стать больше 1, но этого не может быть. Поэтому если угол падения больше критического, то преломление отсутствует и весь свет отражается от границы раздела двух сред. Это явление получило название **полного внутреннего отражения**.

Следует ещё раз подчеркнуть, что явление полного отражения возникает только при переходе из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления (например, из воды в воздух или из стекла в воздух).

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА Явление полного внутреннего отражения света используется, например, в волоконной оптике — технологии передачи света по тонким нитям из прозрачных материалов.

Оптическое волокно состоит из светопередающей сердцевины с показателем преломления n_1 , оболочки с показателем преломления n_2 (при этом $n_1 > n_2$) и защитного покрытия. Оболочка препятствует рассеянию света, а внешнее покрытие (полимерное, металлическое и др.) предохраняет световод от внешних воздействий.

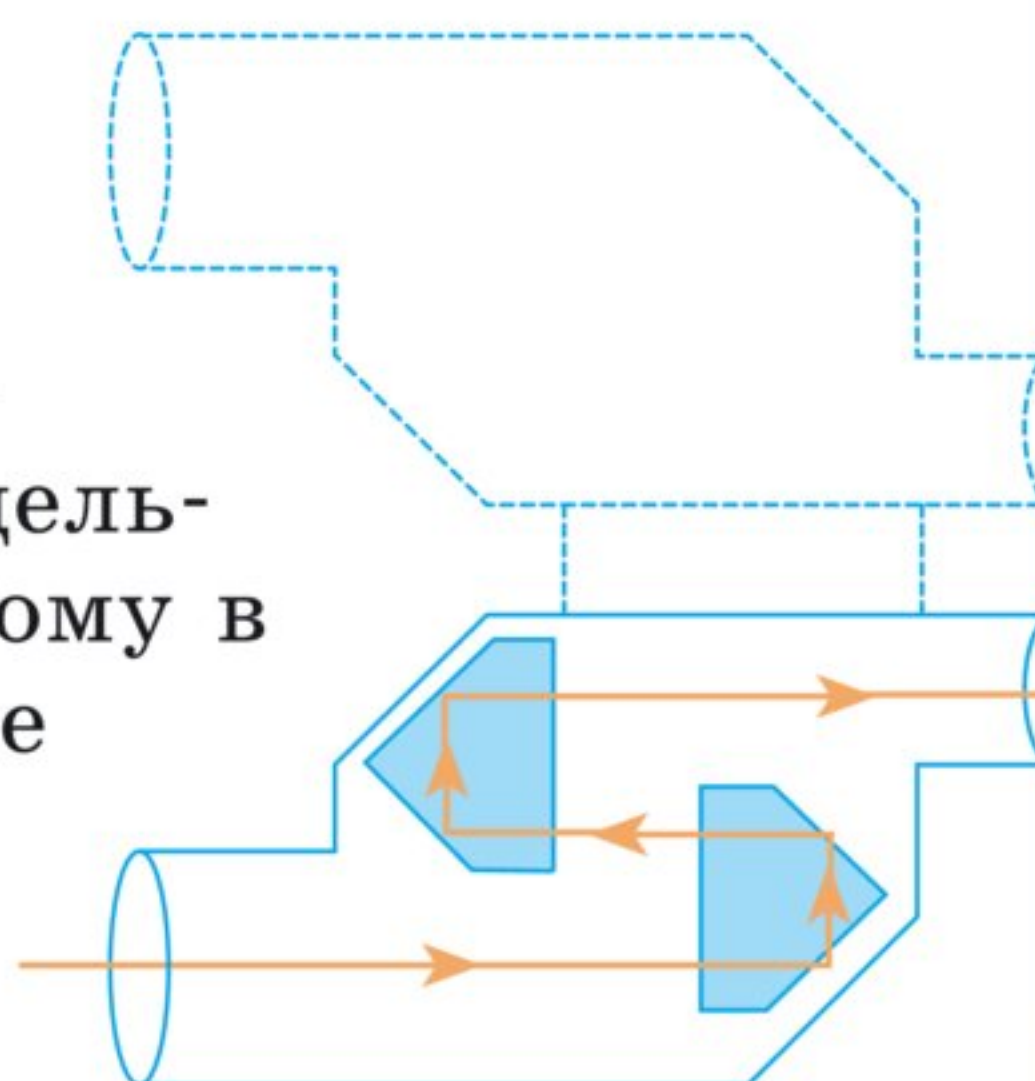


Диаметр таких волокон может достигать нескольких микрометров. Пучок этих тонких волокон, изготовленных из стекла или пластика, называют световодом. Свет, распространяясь по тонкому волокну, испытывает полное внутреннее отражение от стенок. Даже при изгибе световода предельный угол обычно не превышает, поэтому свет передаётся по световоду практически без потерь.

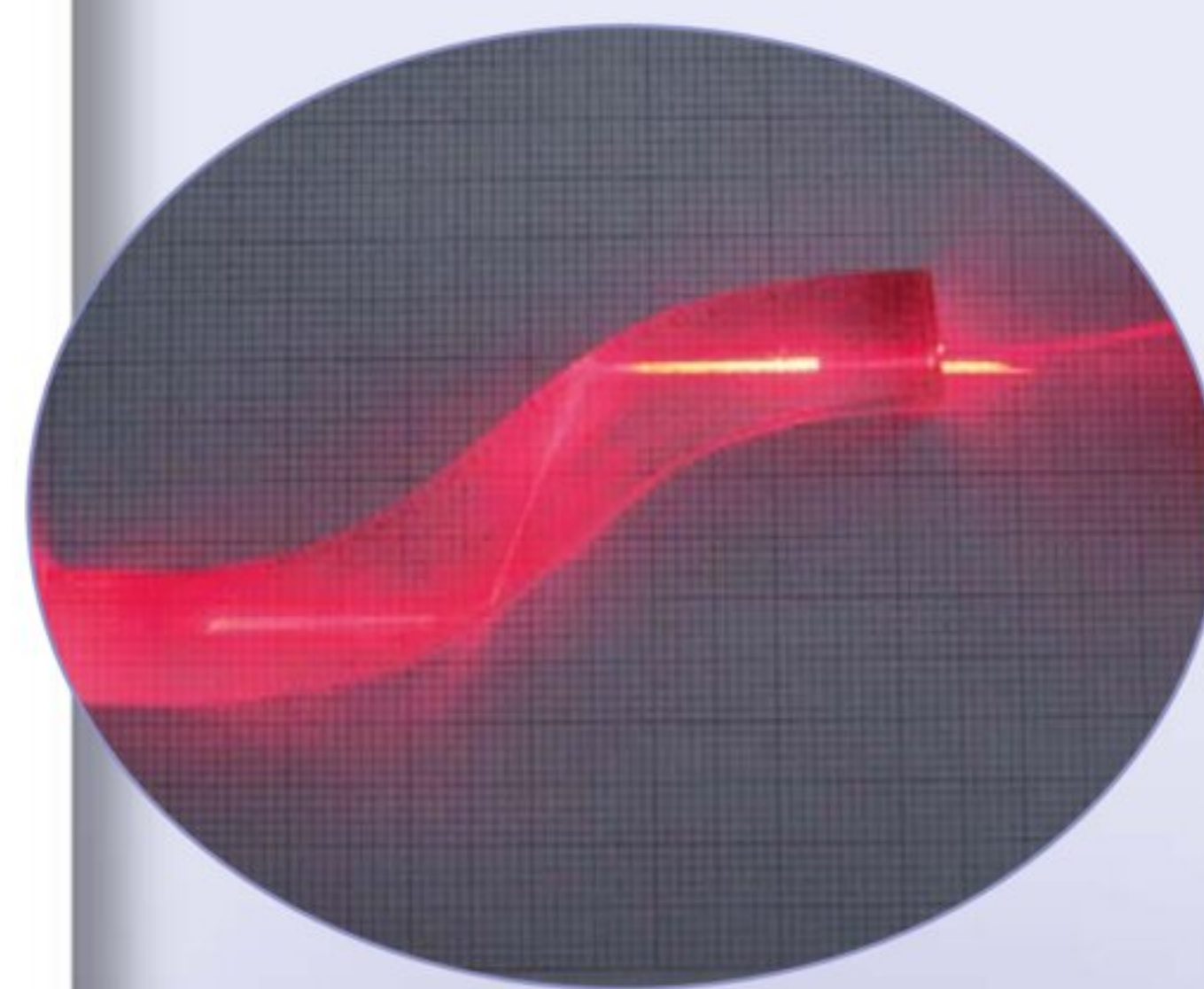
Световоды нашли применение в медицинской технике. При введении в тело пациента они передают изображение органа или поражённого участка на внешнюю телекамеру, исключая тем самым необходимость исследования с помощью хирургических методов. Например, введя световод через пищевод пациента, врач может обследовать его желудок. По одним волокнам посылаётся свет для освещения желудка, а по другим идёт отражённый свет. В таком световоде волокна должны быть строго параллельны, чтобы изображение получилось чётким.

Световоды также используют в автомобилях для подачи света от общего источника к различным приборным панелям. Оптические волокна часто используют для связи компьютеров, телевизионных установок и телефонов.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В ПРИЗМАХ Полное внутреннее отражение света в призмах используется во многих оптических приборах. Для стекла предельный угол составляет около 42° , поэтому в стеклянной прямоугольной призме можно повернуть световой луч на 90° или на 180° . Это используется, например, в биноклях.



Оптическое волокно



Явление полного внутреннего отражения используют также при огранке бриллиантов. В бриллианте, у которого соблюдены пропорции, луч света, входящий через верхние грани, дважды полностью отражается от боковых граней и выходит наружу в глаз наблюдателя. Благодаря этому свойству бриллиант не пропускает свет «насквозь» в отличие от большинства имитаций.



ВОПРОСЫ:

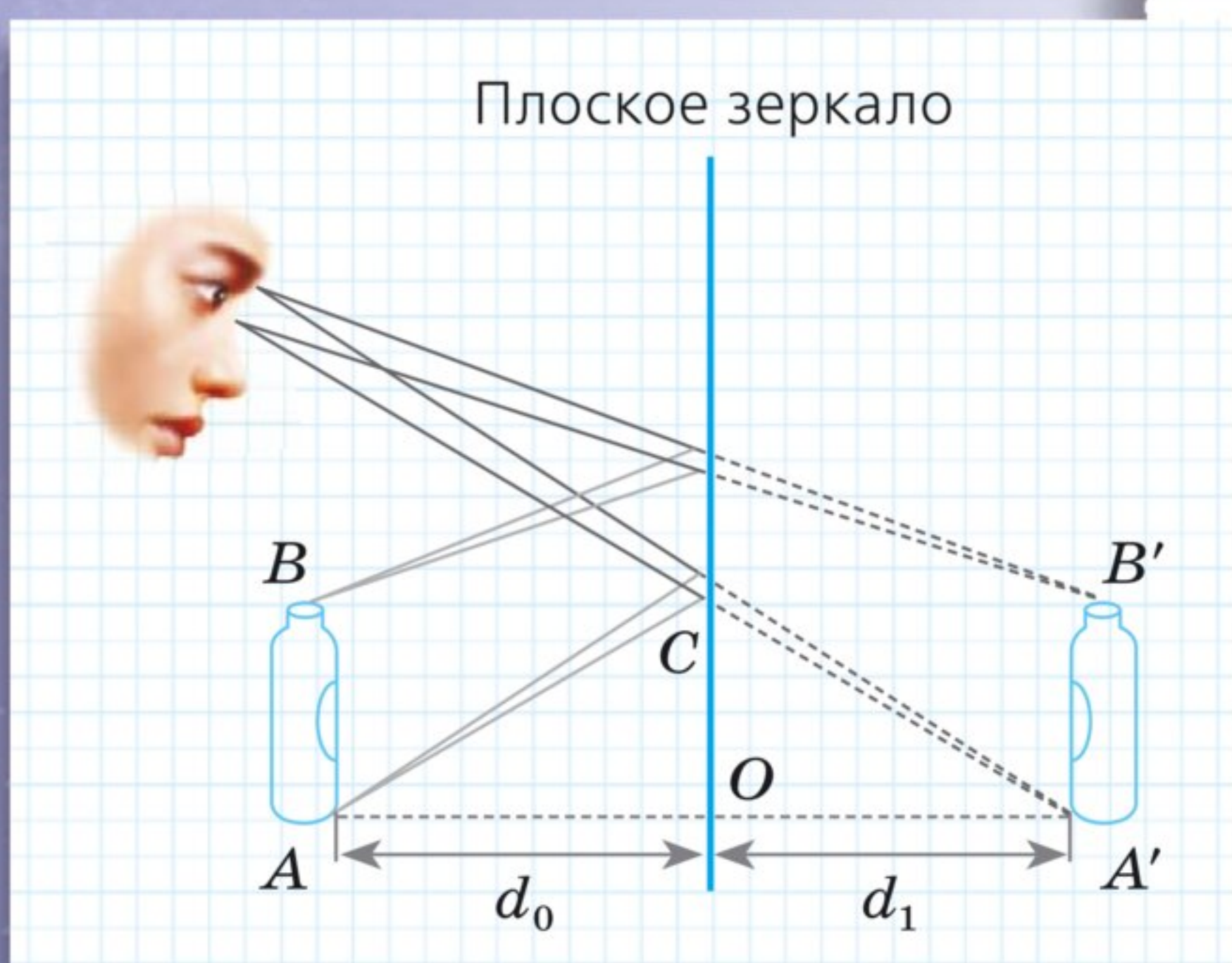
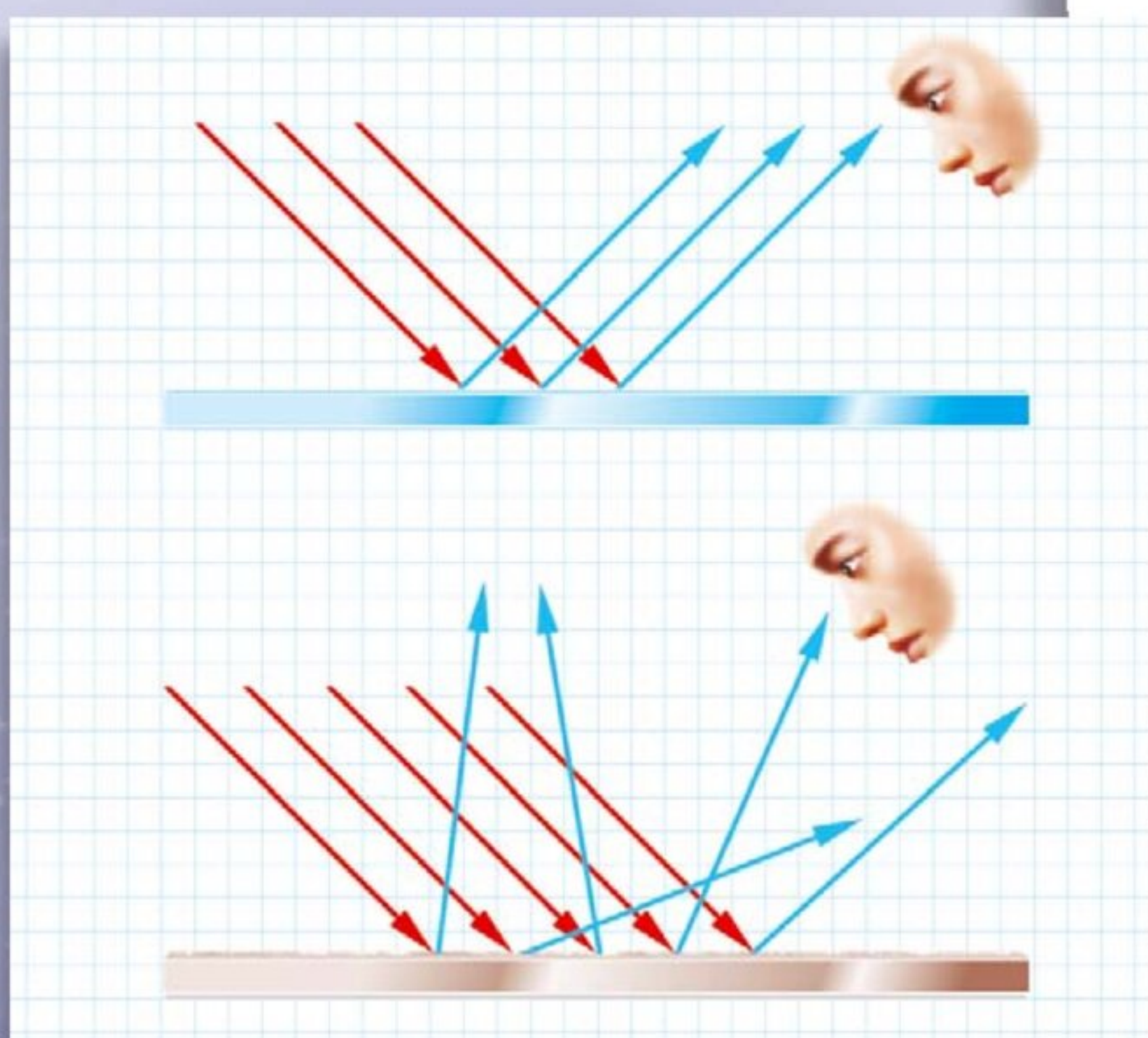
- Что такое полное внутреннее отражение света?
- Что такое предельный угол падения?
- При каком соотношении оптических плотностей сред происходит полное отражение света на их границе?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как строить изображение в плоском зеркале.
- Как строить изображение в линзах.
- Формулу тонкой линзы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое зеркальное и рассеянное отражение света?
- Как формулируется закон отражения?

**ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО. ЛИНЗЫ**

Начиная с глубокой древности люди искали способы улучшить своё зрение, позволить человеческому глазу увидеть то, что в обычной жизни увидеть не получается. Открытия и изобретения привели к появлению оптических приборов, от простых до очень сложных. Зеркала и линзы являются основными элементами оптических приборов, как используемых в нашей повседневной жизни, так и играющих важную роль в научных исследованиях.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПЛОСКОМ ЗЕРКАЛЕ

Плоскую поверхность, зеркально отражающую свет, называют *плоским зеркалом*. Зеркальное отражение свойственно очень гладким поверхностям. Глядя на зеркало, мы не видим самого зеркала, а видим изображения предметов, которые в нём возникают. В отличие от зеркального отражения, рассеянное (диффузное) отражение позволяет нам видеть обычные предметы, имеющие шероховатые поверхности.

Если направить пучок света на поверхность стола или на лист бумаги, то мы будем видеть отражение света из различных точек. Если же пучок света направлен на зеркало, то отражение мы увидим только под определённым углом, соответствующим закону отражения.

Когда предмет находится перед зеркалом, то кажется, что за зеркалом находится такой же предмет. То, что мы видим за зеркалом, называют **изображением предмета**.

Рассмотрим, как формируется изображение в плоском зеркале. Для простоты из всех лучей, падающих от тела на зеркало, выделим два узких пучка лучей (из точек A и B). По закону отражения каждый из лучей отражается от зеркала под таким же углом, под которым он падает на зеркало. Продолжим отражённые лучи в обратном направлении. Тогда они сойдутся в некоторых точках A' и B' , находящихся за зеркалом. Нам кажется, что лучи, попадающие в глаз, исходят из точек A' и B' , которые принадлежат изображению тела.

Изображение в плоском зеркале называют **мнимым**, так как оно получается в результате пересечения не реальных лучей света, а их воображаемых продолжений.

Пользуясь признаками равенства треугольников, можно доказать, что $\triangle ACO = \triangle A'CO$. Следовательно, $AO = A'O$, т.е. изображение предмета за зеркалом находится на таком же расстоянии от него, как и сам предмет. Из геометрических соображений также следует, что высота изображения равна высоте самого тела: $AB = A'B'$.

Предмет и его изображение в плоском зеркале представляют собой фигуры, симметричные относительно плоскости зеркала. Это означает, что они не тождественны, в зеркале «право» и «лево» меняются местами.

Подводя итоги, можно сказать, что изображение предмета в плоском зеркале всегда является мнимым;

прямым, т. е. не перевёрнутым; равным по размеру самому предмету; находящимся на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним; симметричным самому предмету.

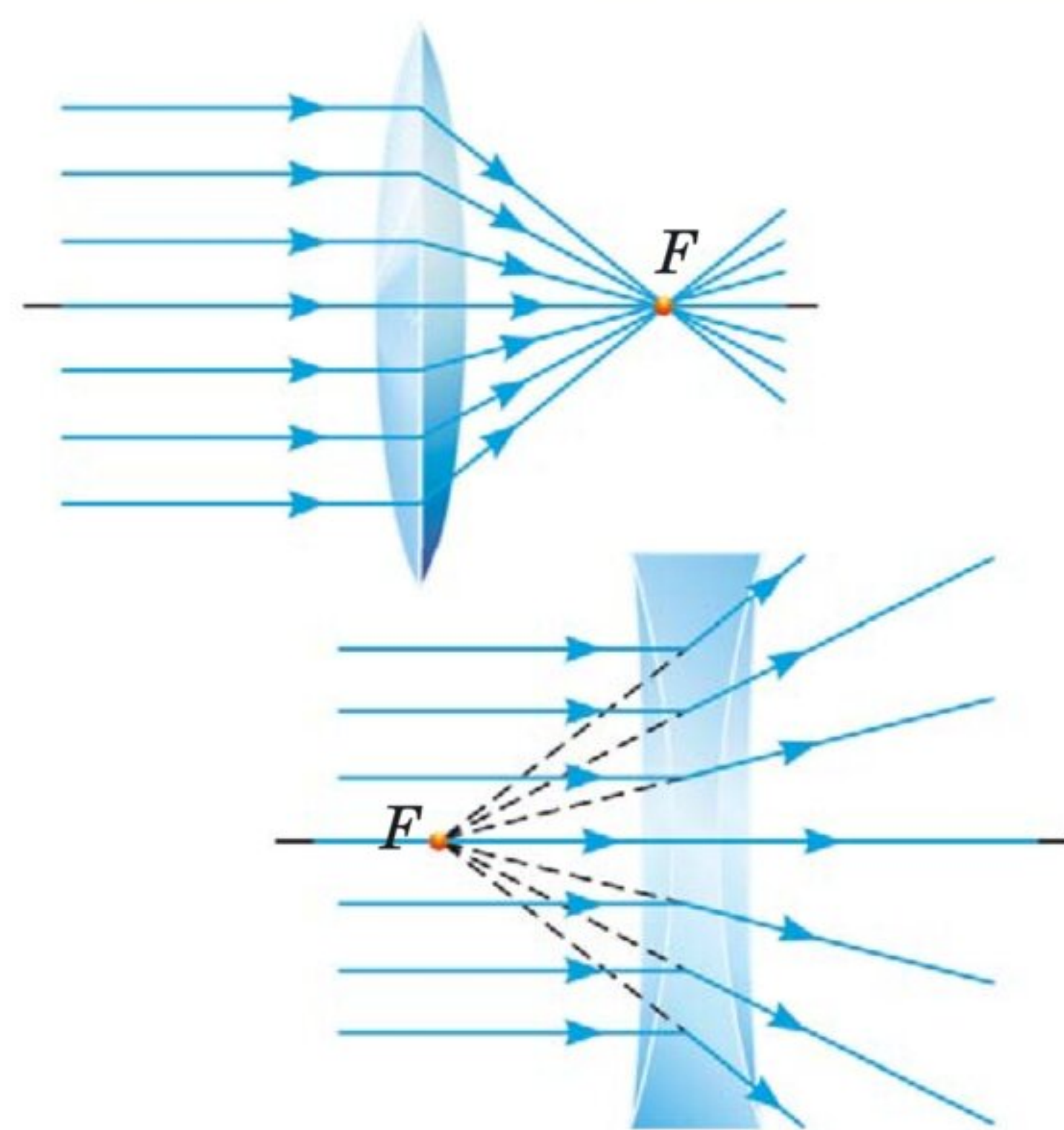
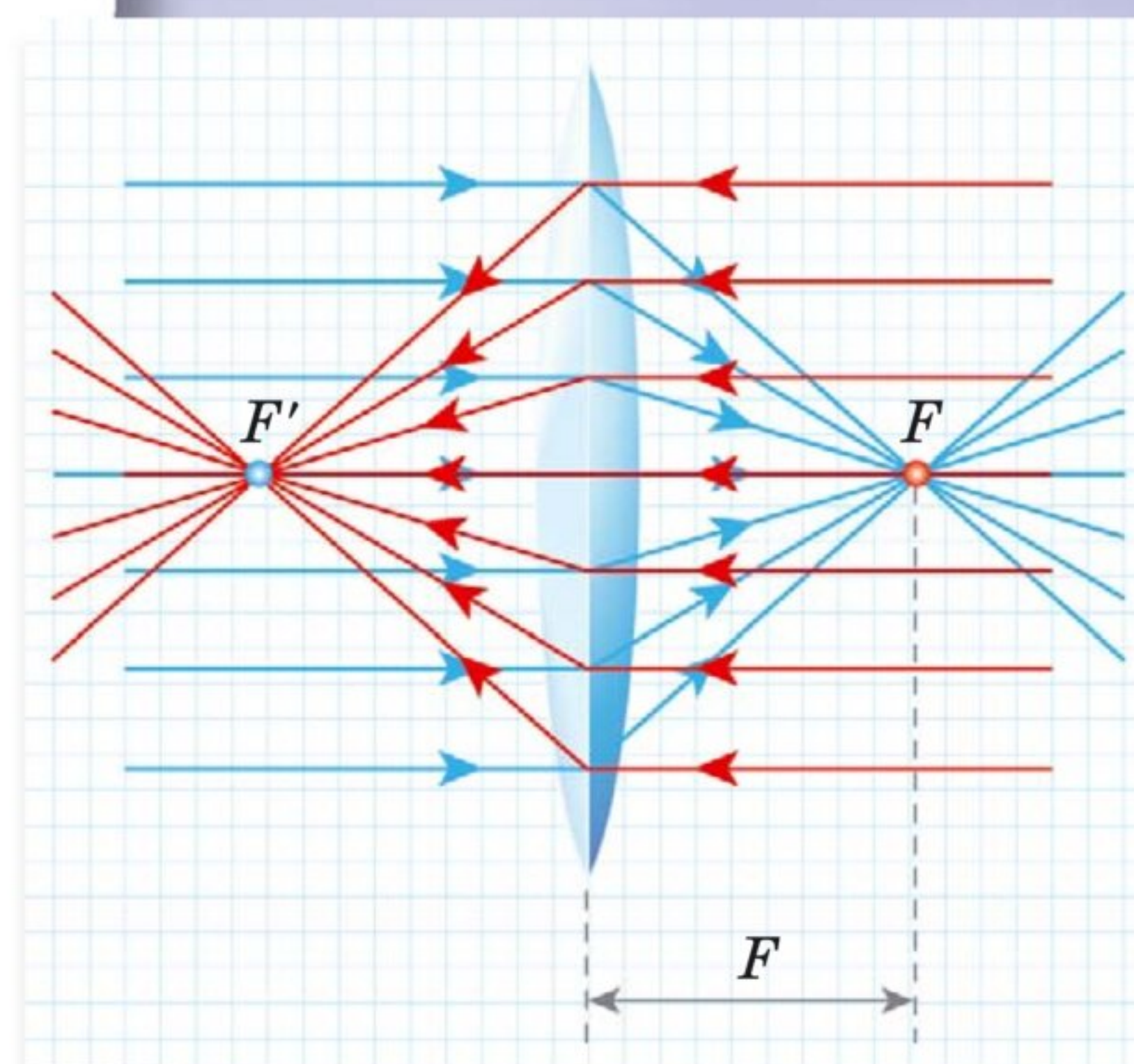
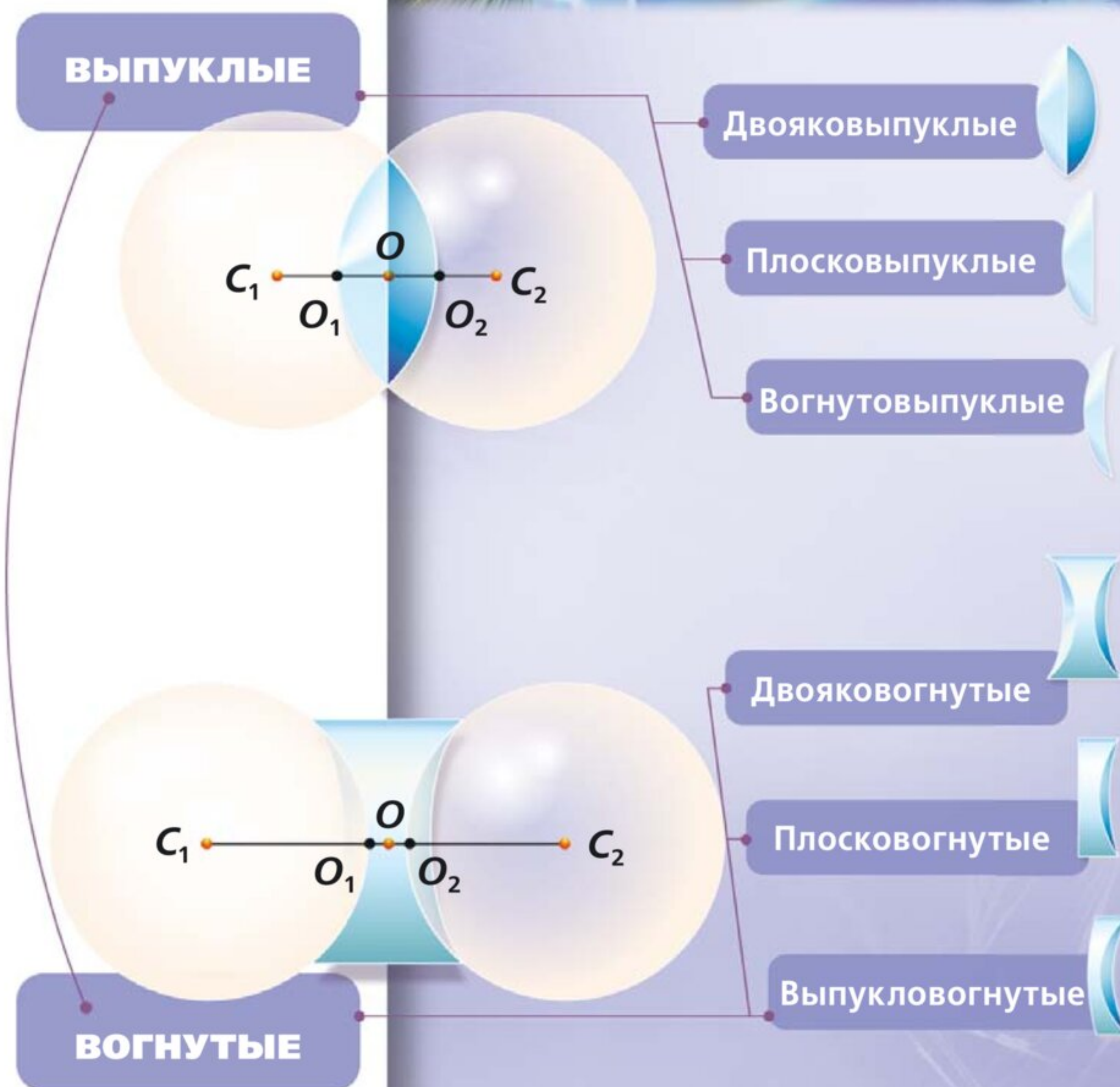
ВИДЫ ЛИНЗ Прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями, называется **линзой**. Линзы бывают выпуклые и вогнутые.

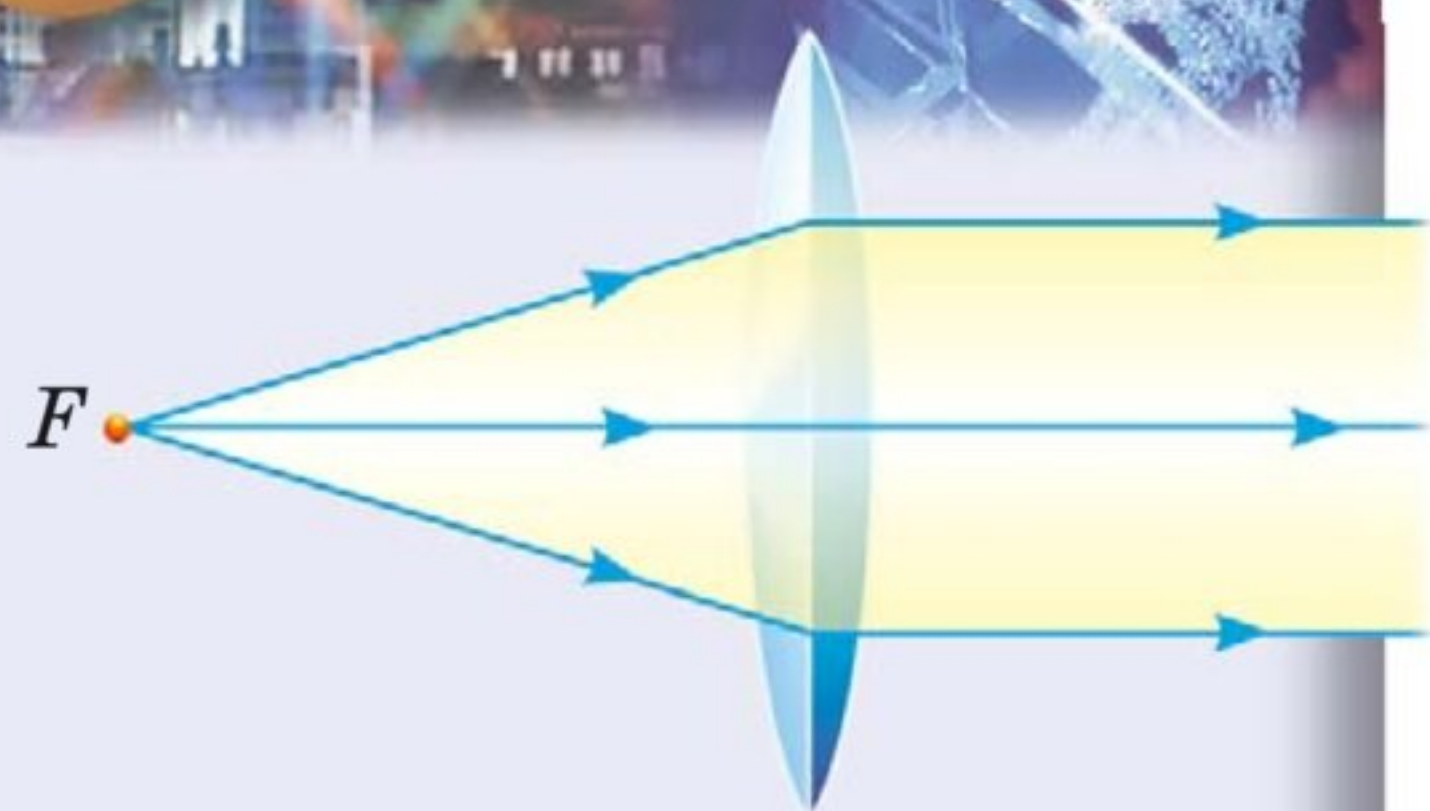
Линзу, у которой края тоньше, чем середина, называют **выпуклой**. Линзу, у которой края толще, чем середина, называют **вогнутой**. Прямую, проходящую через центры C_1 и C_2 сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют **главной оптической осью линзы**.

Рассмотрим линзы, толщина которых мала по сравнению с радиусами поверхностей. Такие линзы называют **тонкими**. Для этих линз вершины сферических поверхностей (точки O_1 и O_2) практически совпадают. Эту точку называют **оптическим центром линзы** (точка O).

Если на выпуклую линзу направить пучок лучей, параллельный главной оптической оси, то после преломления в линзе эти лучи пересекутся в одной точке F , которая находится на главной оптической оси. Эту точку называют **главным фокусом линзы**. Если световой пучок пропустить через линзу с другой стороны, то будет наблюдаться та же картина. У каждой линзы два главных фокуса, по одному с каждой стороны. Расстояние от линзы до её фокуса называют **фокусным расстоянием линзы** и обозначают F .

СОБИРАЮЩИЕ И РАССЕИВАЮЩИЕ ЛИНЗЫ В зависимости от того, что происходит после преломления с пучком световых лучей, линзы делят на собирающие и рассеивающие. Пучок лучей, направленный на выпуклую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления соберётся в одной точке — фокусе линзы, поэтому выпуклую линзу называют **собирающей**. Если же такой пучок лучей направить на вогнутую линзу, то после преломления в линзе пучок станет расходящимся. Если продолжить преломлённые лучи в обратном направлении, то они сойдутся в одной точке с той стороны линзы, с какой падает на неё свет. Эту точку называют **мнимым фокусом**, а саму вогнутую линзу называют **рассеивающей**. Фокусное расстояние линзы зависит от степени кривизны её поверхностей. Линза с более выпуклыми поверхностями преломляет лучи сильнее, чем линза с менее выпуклыми поверхностями, поэтому её фокусное расстояние меньше.





Поместим точечный источник света в фокус выпуклой линзы. Лучи от источника света расходятся во всех направлениях, некоторые из них проходят через линзу и преломляются. После прохождения через линзу лучи будут направлены параллельно главной оптической оси.

ЛУЧИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для того чтобы получилось изображение любой точки предмета, необходимо, чтобы световые лучи, исходящие от неё в различных направлениях, после преломления в линзе снова собирались в одну точку. Если выходящие из

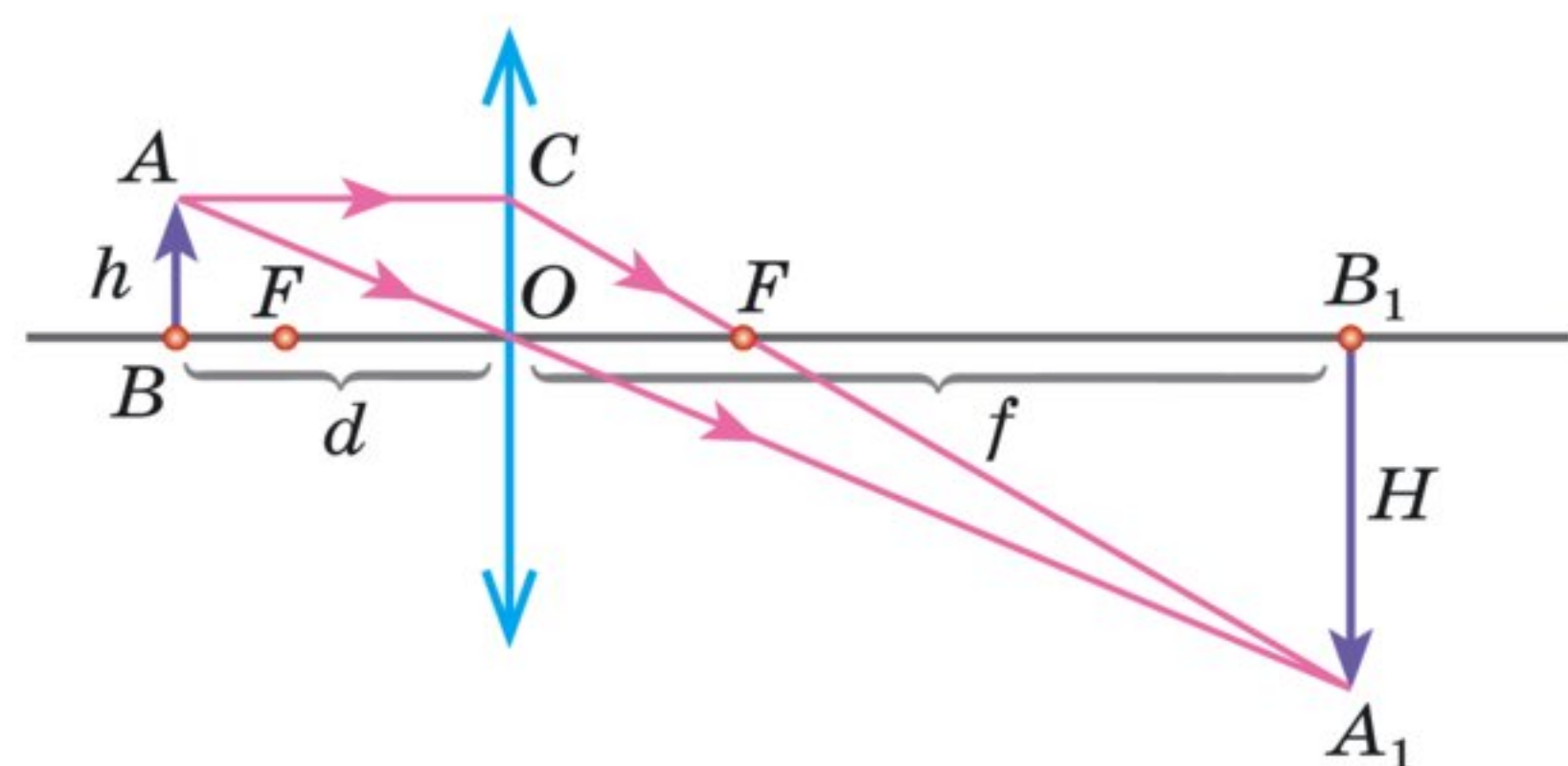
линзы лучи сходятся, то они образуют действительное изображение. Если же прошедшие через линзу лучи являются расходящимися, то пересекаются в одной точке не сами лучи, а их продолжения. В этом случае получается мнимое изображение. Для того чтобы построить изображение любой точки, достаточно рассмотреть два луча из трёх стандартных лучей:

1) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси линзы. После преломления луч либо сам (если линза собирающая), либо своим продолжением (если линза рассеивающая) проходит через фокус линзы;

2) луч, проходящий через оптический центр линзы. При прохождении через линзу этот луч не изменяет своего направления, так как линза является тонкой;

3) луч, проходящий через фокус. После преломления он идёт параллельно главной оптической оси. Точка пересечения этих лучей (или их продолжений) является изображением исходной точки.

ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ Как связаны между собой расстояние от предмета до линзы d , расстояние от линзы до изображения f и фокусное расстояние F ?



Треугольники AOB и A_1OB_1 подобны, следовательно,

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

Из подобия треугольников FOC и FB_1A_1 запишем:

$$\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FB_1}.$$

Учитывая, что $AB = OC$, получим

$$\frac{FO}{FB_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

Так как $FO = F$, $FB_1 = f - F$, $BO = d$, $B_1O = f$, то

$$\frac{F}{f - F} = \frac{d}{f}, \text{ или } fF + dF = df.$$

Разделим обе части уравнения на произведение dfF и получим **формулу тонкой линзы**:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

В формуле (1) принято считать $F > 0$ для собирающей линзы и $F < 0$ для рассеивающей.

Говорят, что собирающие линзы имеют **действительный фокус**, а рассеивающие — **мнимый**.

Для действительного изображения $f > 0$, а для мнимого $f < 0$.

ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА И УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Оптическая сила линзы — это величина, обратная её фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем больше её оптическая сила, т. е. тем сильнее она преломляет лучи. Увеличением линзы называют отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

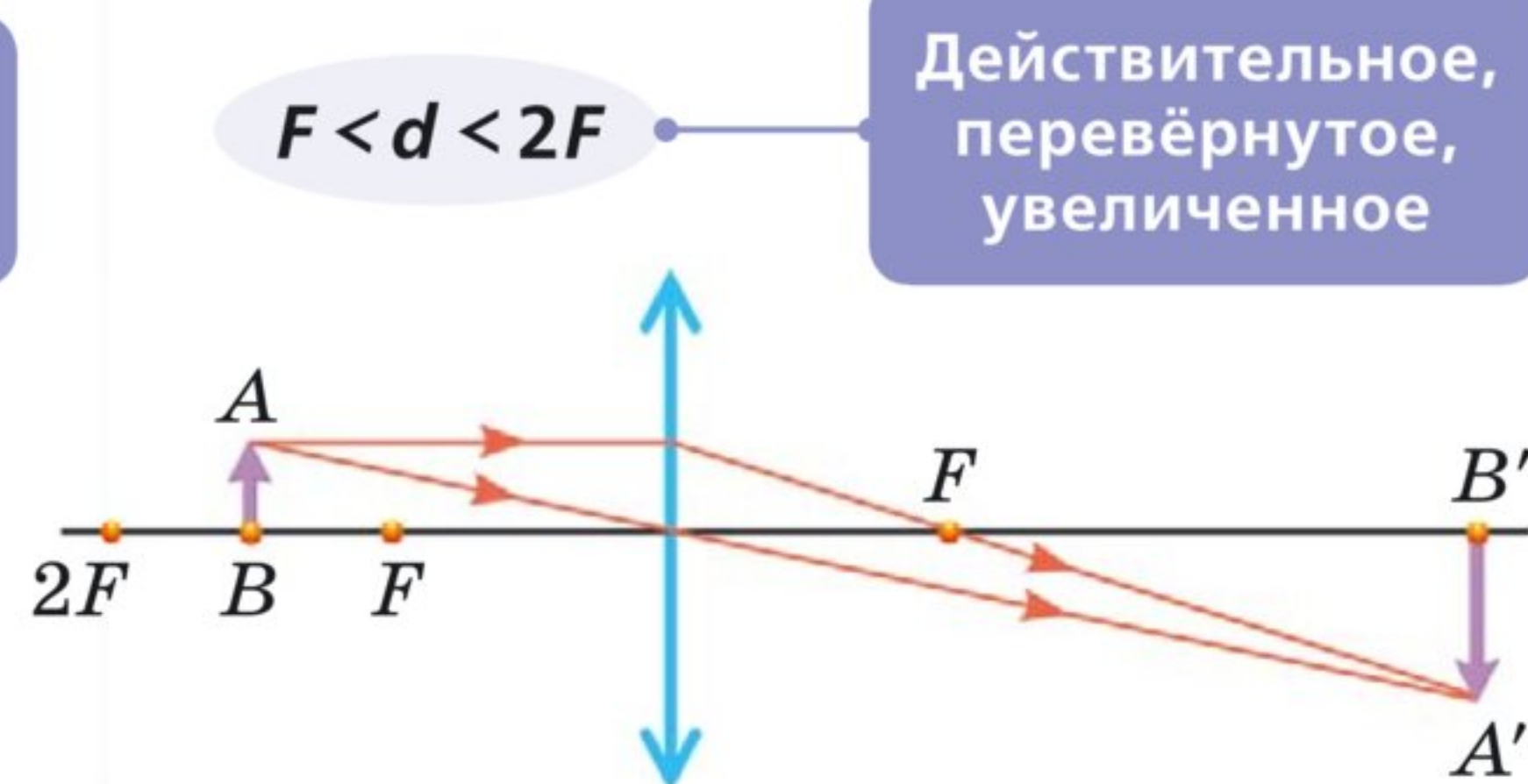
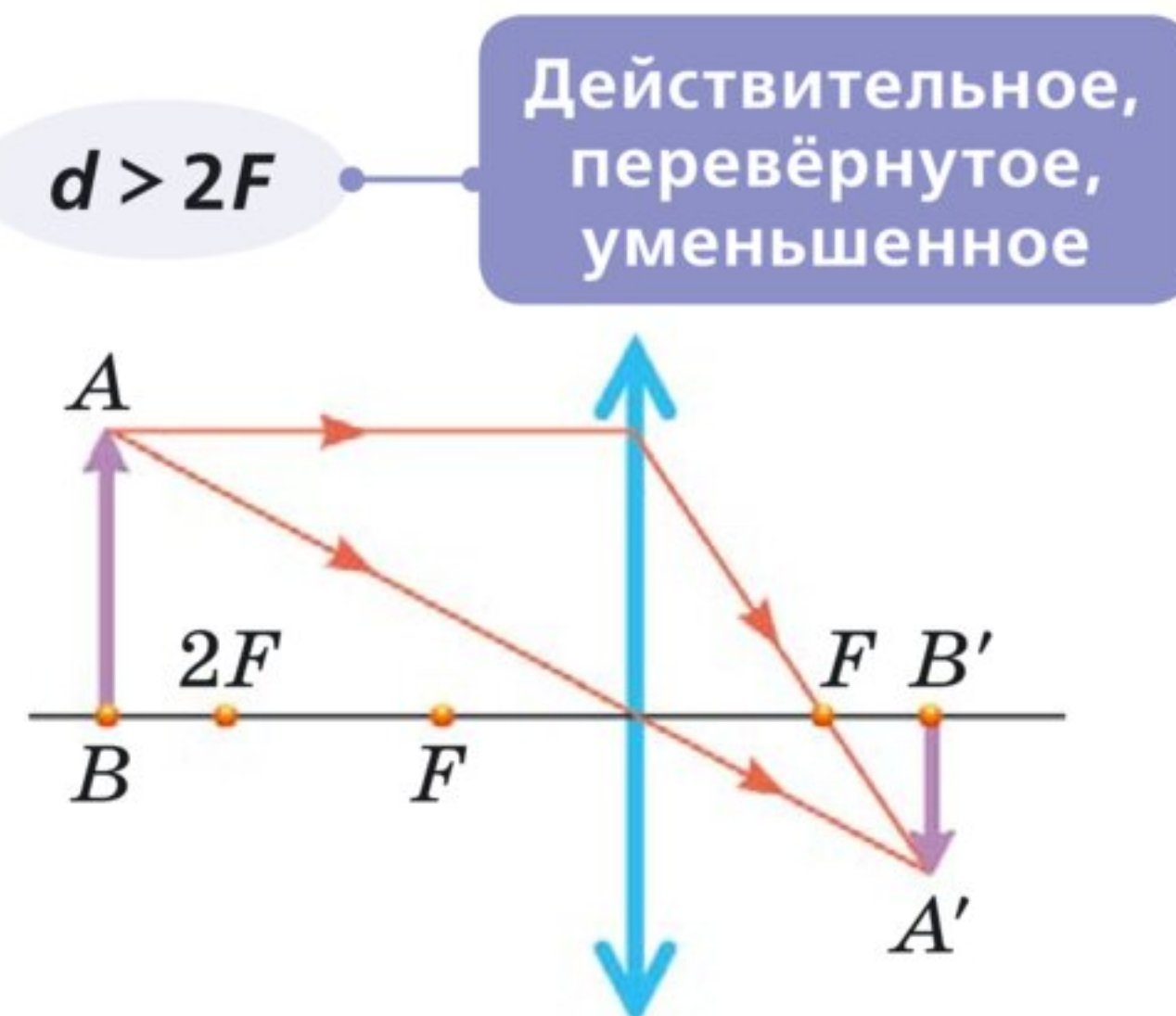
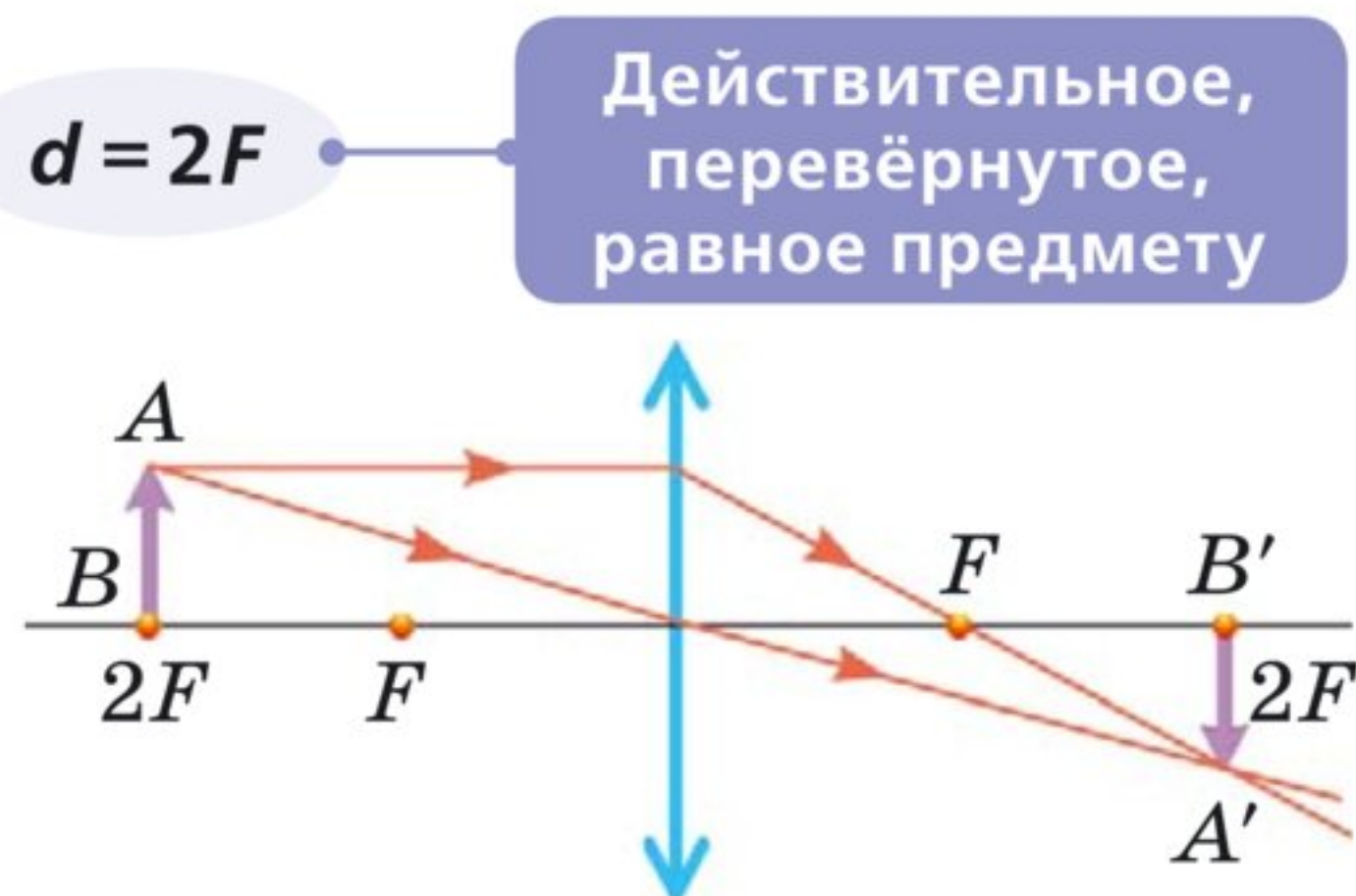
Используя подобие треугольников AOB и A_1OB_1 , можно записать:

$$\Gamma = \frac{f}{d}.$$

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ДАВАЕМЫХ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ

Чтобы построить изображение линейного предмета, например стрелки AB , необходимо построить сначала изображение точки A , затем изображение точки B , после чего соединить полученные точки A' и B' . В зависимости от взаимного расположения предмета и линзы изображение будет различным: увеличенным или уменьшенным, прямым или перевёрнутым, действительным или мнимым.

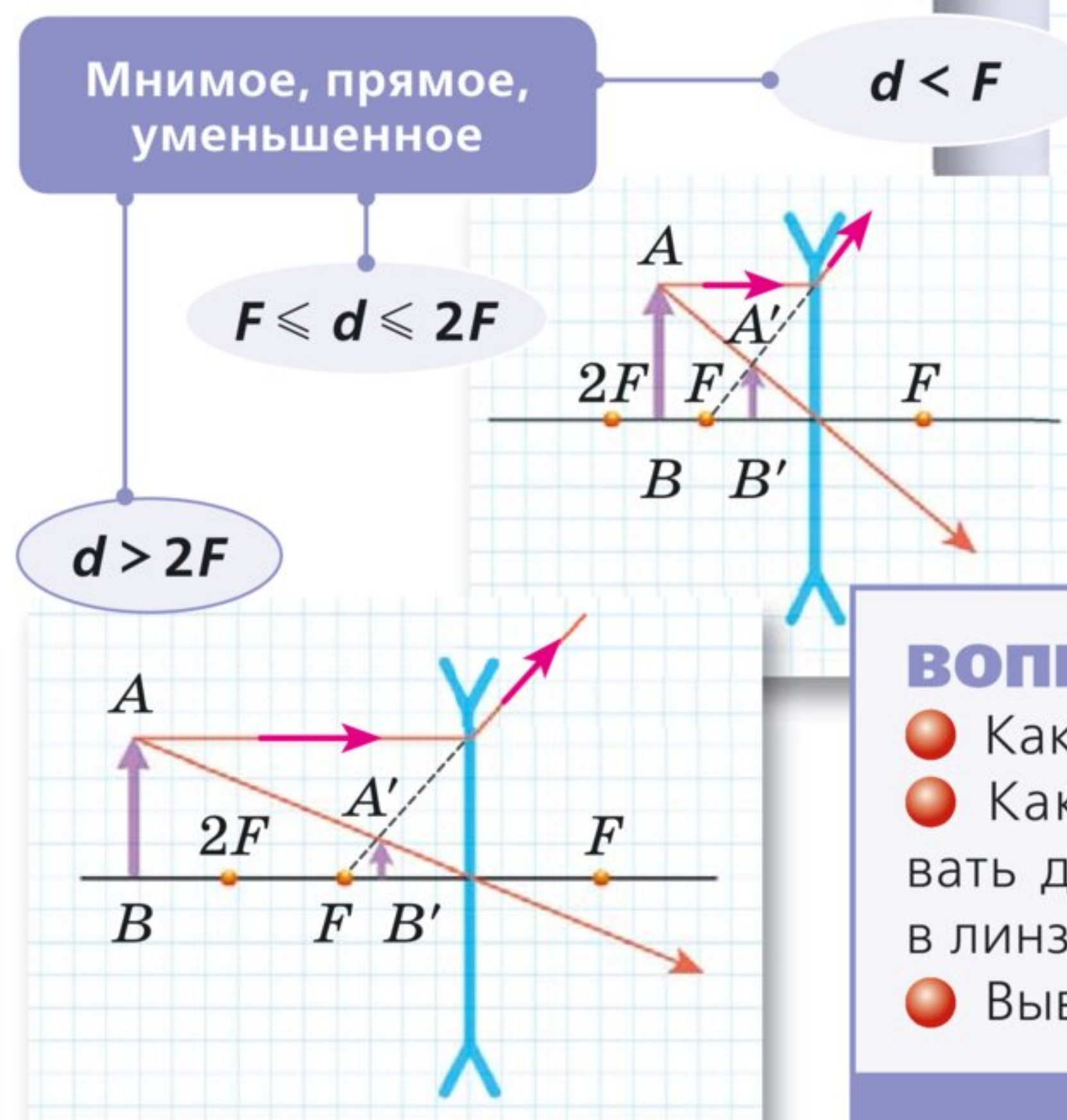
Обозначим расстояние от предмета до линзы d , а фокусное расстояние F .



ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ДАВАЕМЫХ РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ

Если пучок лучей направить на вогнутую линзу, то после преломления в линзе пучок станет расходящимся, поэтому при помощи рассеивающей линзы невозможно получить действительное изображение.

Изображение, даваемое рассеивающей линзой, является мнимым, прямым и уменьшенным вне зависимости от взаиморасположения линзы и предмета.

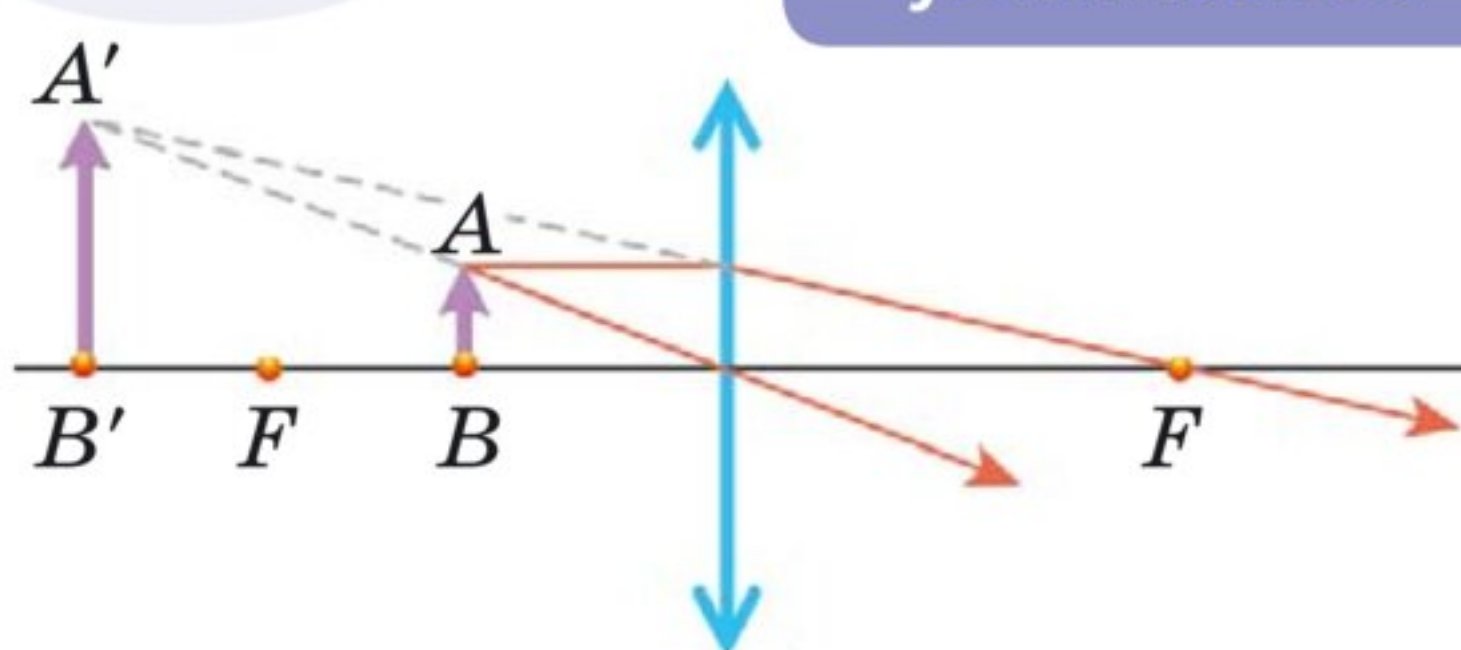


За единицу оптической силы принята диоптрия (дптр).

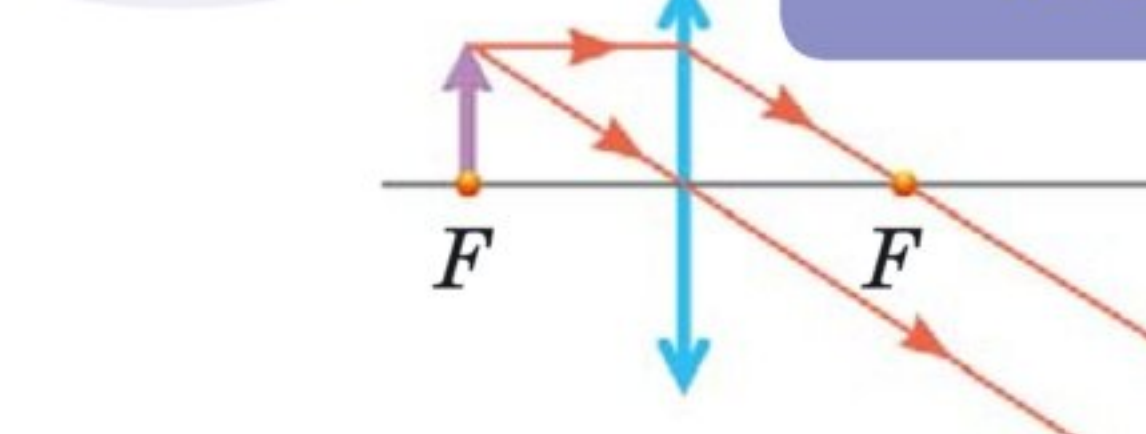
1 диоптрия — это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м:

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{1 \text{ м}} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

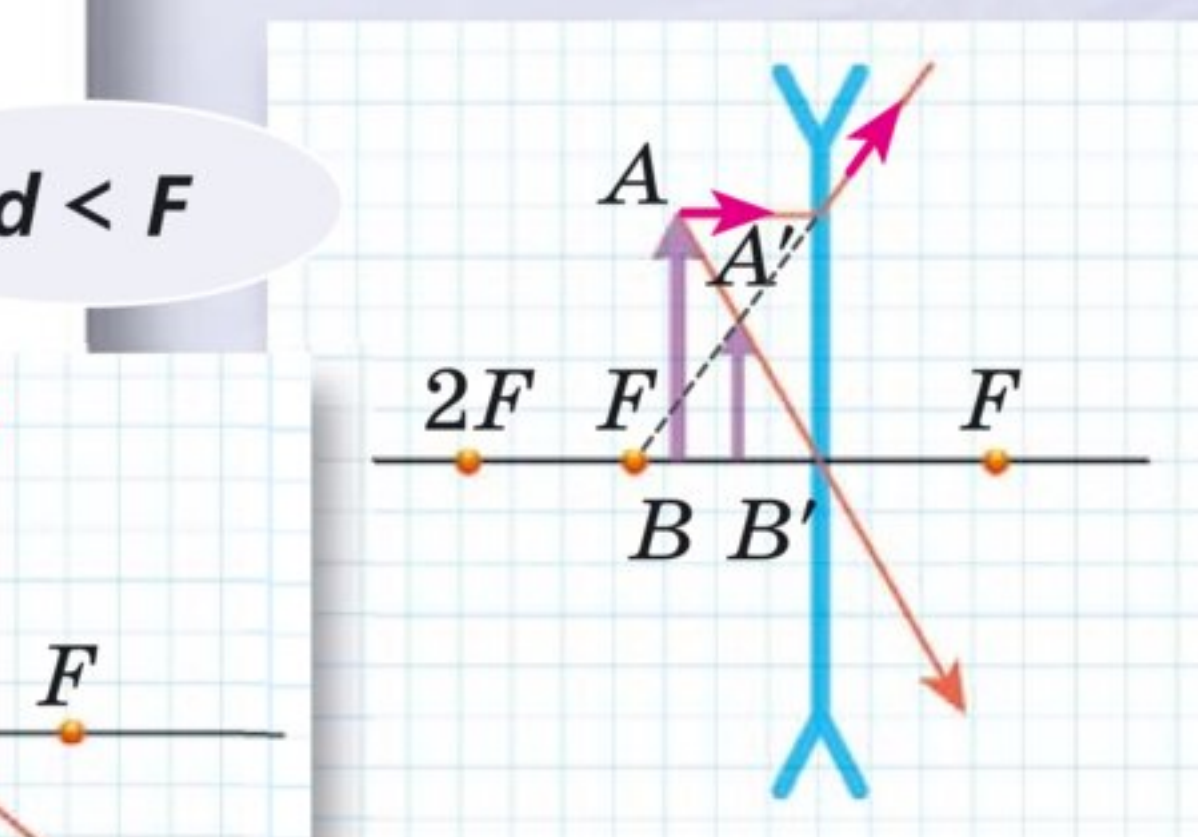
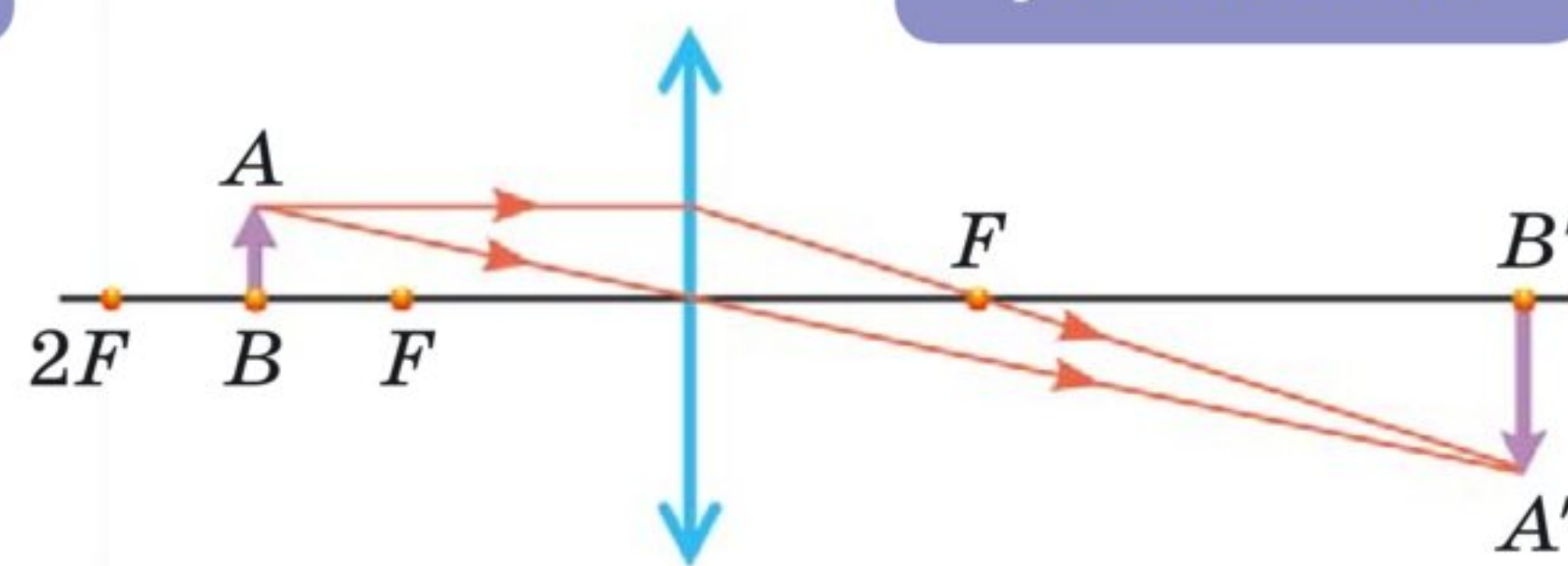
$d < F$ Мнимое, прямое, увеличенное



$d = F$ Изображения не будет



$F < d < 2F$ Действительное, перевёрнутое, увеличенное



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какие виды линз вы знаете?
- Какие лучи можно использовать для построения изображения в линзах?
- Выведите формулу тонкой линзы.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каково строение глаза.
- Что такое аккомодация.
- Что такое близорукость и даль-
нозоркость.

ВСПОМНИТЕ:

- Каким бывает изображение, по-
лучаемое в линзе?
- Что такое фокус линзы?



Остротой зрения называют способность различать границы и детали видимых объектов. Остро-та зрения определяется по мини-мальному угловому расстоянию между двумя точками, при кото-ром они воспринимаются раздель-но. За норму, соответствующую остроте зрения 1.0, принимается такая различительная способность глаза, при которой две точки вид-ны как раздельные, если угол между лучами, идущими от них в глаз, равен 1° .



ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Органы зрения являются важнейшими органами чувств как человека, так и большинства животных. Органы зрения также называют зрительными анализаторами. Орган зрения — это не только глаз. Люди видят благодаря тому, что информация, полученная посредством глаза, передаётся в определённые области коры головного мозга, где и формируется та картина внешнего мира, которую мы видим.

СТРОЕНИЕ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Глаз человека является сложным оптическим прибором, состоящим из двух линз с переменным фокусным расстоянием. Глаз, или глазное яблоко, имеет почти шарообразную форму. Снаружи глаз покрыт прочной белой оболочкой — **склерой**, которая защищает его от повреждений.

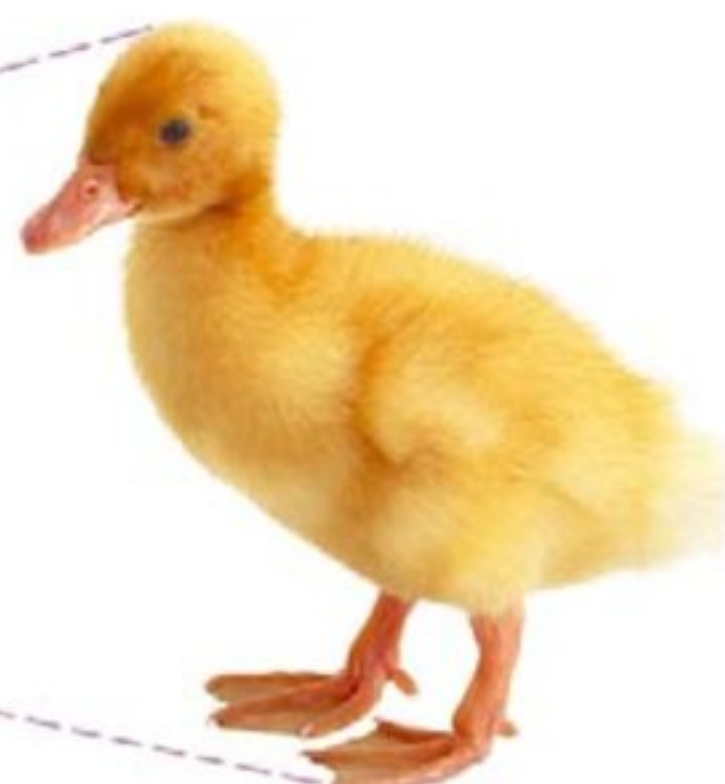
Передняя часть склеры прозрачна для света и назы-вается **роговицей**. За роговицей расположена прозрач-ная водянистая масса, а за ней — **радужная оболочка**. Она определяет цвет глаз. В радужной оболочке есть от-верстие — **зрачок**. Диаметр зрачка может изменяться: увеличиваться в темноте и сокращаться на свету. По-сле зрачка свет проходит через **хрусталик** — прозрачное тело, напоминающее двояковыпуклую линзу. Хрусталик окружён мышцами, прикрепляющими его к склере. За хрусталиком расположено **стекловидное тело**, заполняю-щее всю остальную часть глаза.

Таким образом, хрусталик разделяет внутреннюю по-верхность глаза на две камеры: **переднюю камеру**, запол-ненную водянистой влагой, и **заднюю камеру**, заполнен-ную стекловидным телом.

Задняя стенка склеры — **сетчатка** — состоит из развет-влений волокон зрительного нерва, чувствительных к све-ту. Светочувствительные клетки, содержащиеся в клетчат-ке, называются **фоторецепторами** (палочки и колбочки).

Оптическая система глаза состоит из роговицы, перед-ней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Световые лучи, попадая в глаз, преломляются в оптической системе глаза, и на сетчатке глаза появляется изображение. Мож-но сказать, что сетчатка является шарообразным экраном, на который проецируется окружающий нас мир. Изобра-жение предмета, возникающее на сетчатке глаза, являет-ся действительным, уменьшенным и перевёрнутым.

Мы видим предметы такими, ка-кие они есть на самом деле потому, что в сетчатке оптическая инфор-мация воспринимается светочув-ствительными нервными клетками и передаётся в мозг. Обработывая сигналы, мозг снова переворачивает изображение.



АККОМОДАЦИЯ Способность глаза приспособливаться к чёткому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза, называют **аккомодацией**. Когда человек смотрит на удалённые предметы, он не напрягает зрение, мышцы, удерживающие хрусталик, расслаблены, и изображение оказывается на сетчатке. Когда человек переводит взгляд на близкие к нему предметы, изображение должно сместиться за сетчатку. Чтобы изображение не было размытым, глазные мышцы сжимают хрусталик, делая его более выпуклым. При этом его кривизна, а значит, и оптическая сила увеличиваются, и изображение опять оказывается на сетчатке. Однако если расположить предмет совсем близко, то мышцы не способны сжать хрусталик в должной степени. Нормальный глаз может длительно без особого напряжения рассматривать предметы, расположенные от него не ближе 25 см. Это расстояние называют **расстоянием наилучшего видения**.

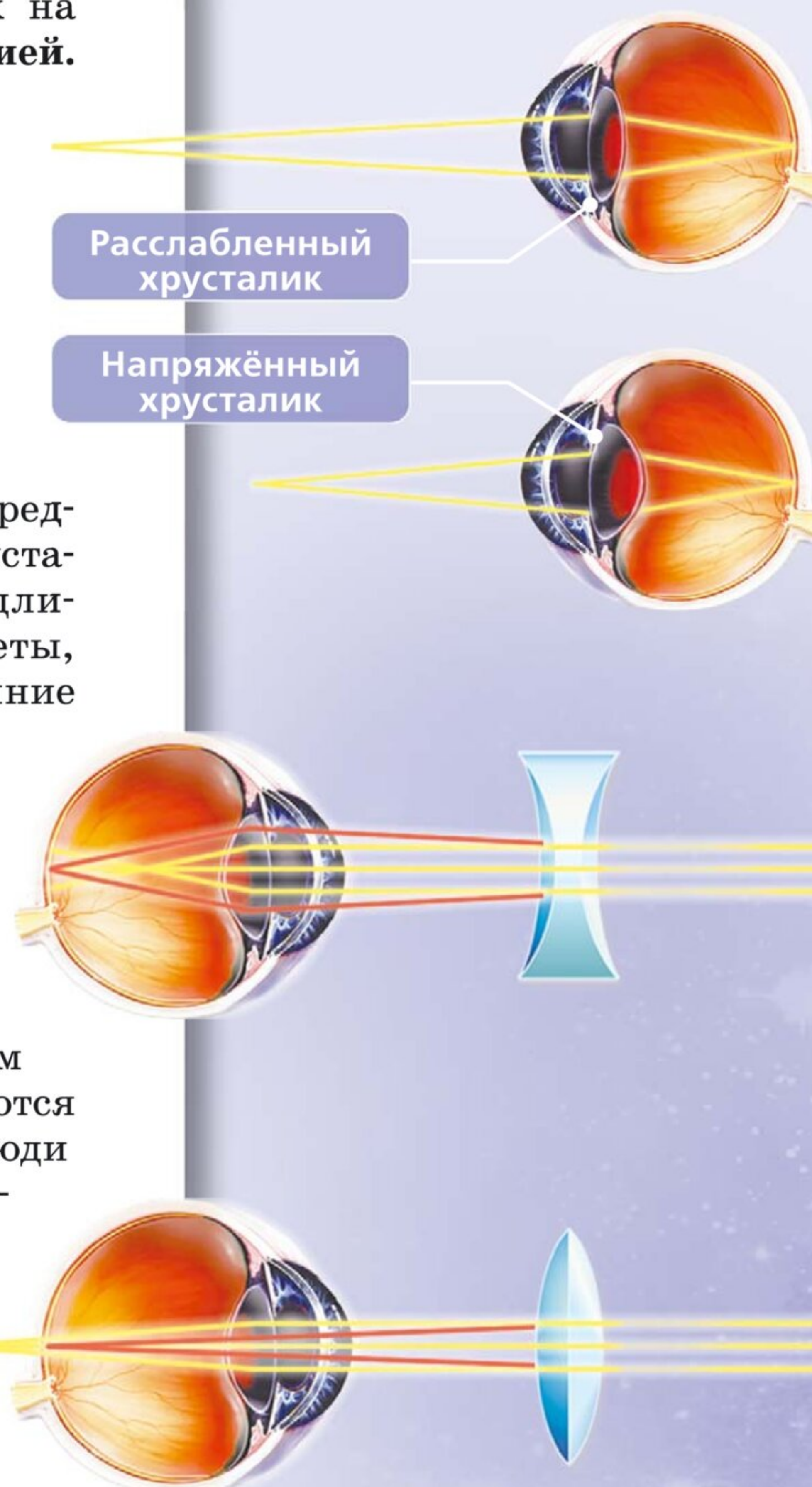
БЛИЗУРОКУСТЬ И ДАЛЬНОЗОРКУСТЬ У человека с хорошим (нормальным) зрением глаз в ненапряжённом состоянии собирает параллельные лучи в точке, лежащей на сетчатке глаза. Наиболее распространены два недостатка зрения: близорукость и дальнозоркость.

Близорукость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а ближе к хрусталику. Близорукие люди не могут чётко видеть удалённые предметы. Расстояние наилучшего зрения для близорукого глаза меньше 25 см.

Дальнозоркость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а за ней. Дальнозорким людям трудно сфокусировать взгляд на близких предметах. Расстояние наилучшего зрения для дальнозоркого глаза больше 25 см.

Близорукость и дальнозоркость исправляют применением линз. При близорукости для того, чтобы изображение отодвинулось от хрусталика и переместилось на сетчатку, следует уменьшить оптическую силу преломляющей системы глаза. Для этого применяют рассеивающие (вогнутые) линзы. При дальнозоркости изображение оказывается за сетчаткой. Оптическую силу системы дальнозоркого глаза надо увеличить. Для этого используют собирающие (выпуклые) линзы.

БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ Наличие двух глаз позволяет сделать наше зрение *стереоскопичным* (или *бинокулярным*), т. е. формировать трёхмерное изображение. При этом в левое полушарие головного мозга попадает информация о том, что справа от нас, а в правое — о том, что слева от нас. Затем две части изображения головной мозг соединяет воедино.



Большинство животных обладает глазами, расположенными по разные стороны головы. Поэтому они видят каждым глазом свою картину — их поле зрения гораздо обширнее.

ВОПРОСЫ:

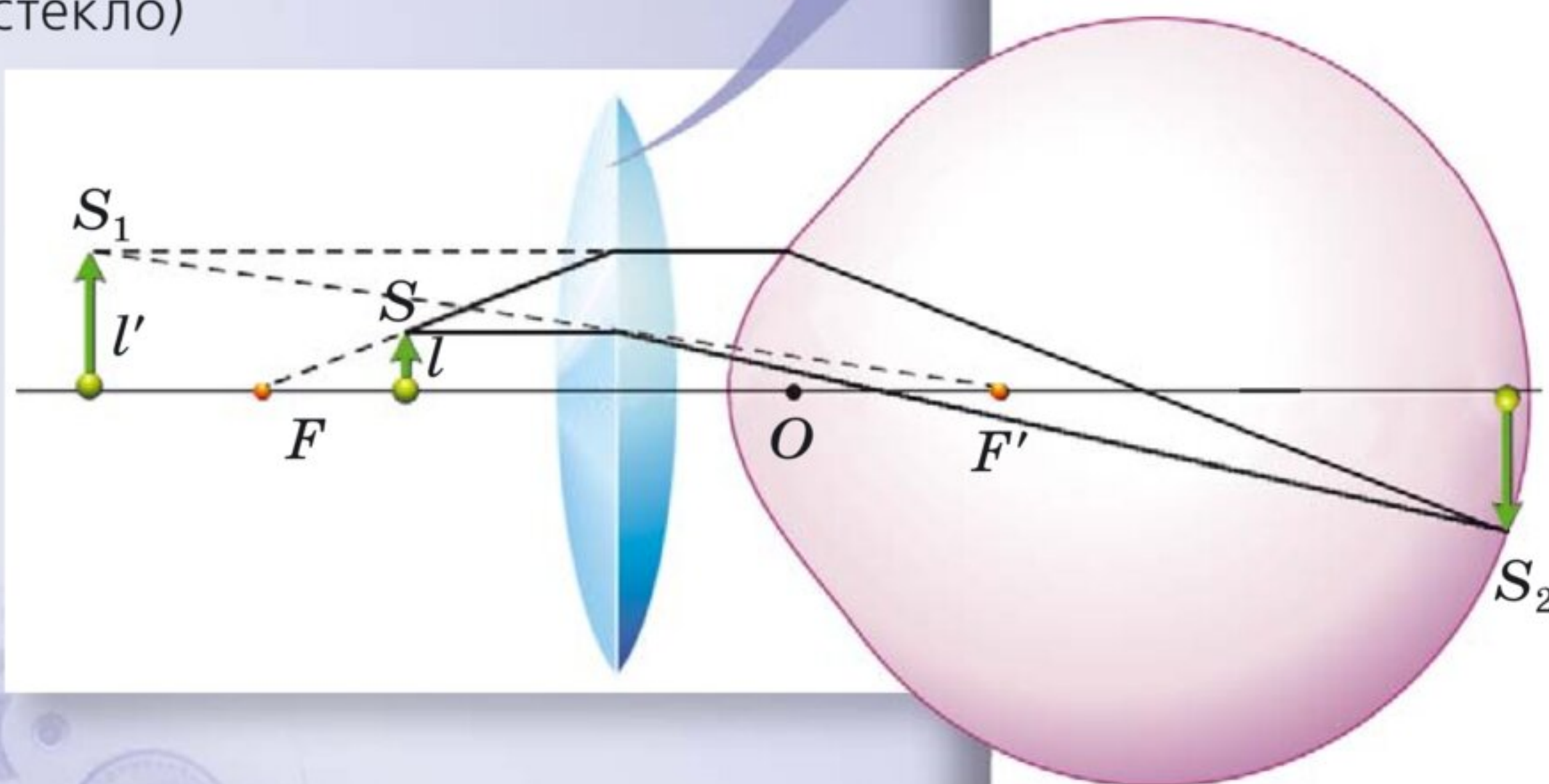
- Каким получается изображение на сетчатке глаза?
- Что такое аккомодация?
- Что такое близорукость и дальнозоркость?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Устройство и принцип действия лупы.
- Устройство и принцип действия оптического микроскопа.
- Устройство и принцип действия оптического телескопа.
- Устройство и принцип действия линзы фотоаппарата.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое линзы?
- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы?



Оптическими приборами называют устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов. Существуют многообразные оптические приборы, которые «вооружают» глаз. Одни из них позволяют различать удалённые предметы (бинокль, телескоп), другие — мелкие предметы (лупа, микроскоп). К оптическим приборам также относят технические устройства, позволяющие получать изображения на экранах, светочувствительных пластинках, фотоплёнках и т. д., установленных в плоскости изображения. К подобным приборам относятся, например, фотоаппарат и проекционный аппарат.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛУПЫ

Простейший оптический прибор — лупа — это собирающая линза с малым фокусным расстоянием (около 10 см). С помощью лупы можно увеличить изображение от 2 до 25 раз. При работе лупу берут за ручку и располагают достаточно близко к глазу, а рассматриваемый предмет помещают на такое расстояние, при котором его изображение становится более чётким.

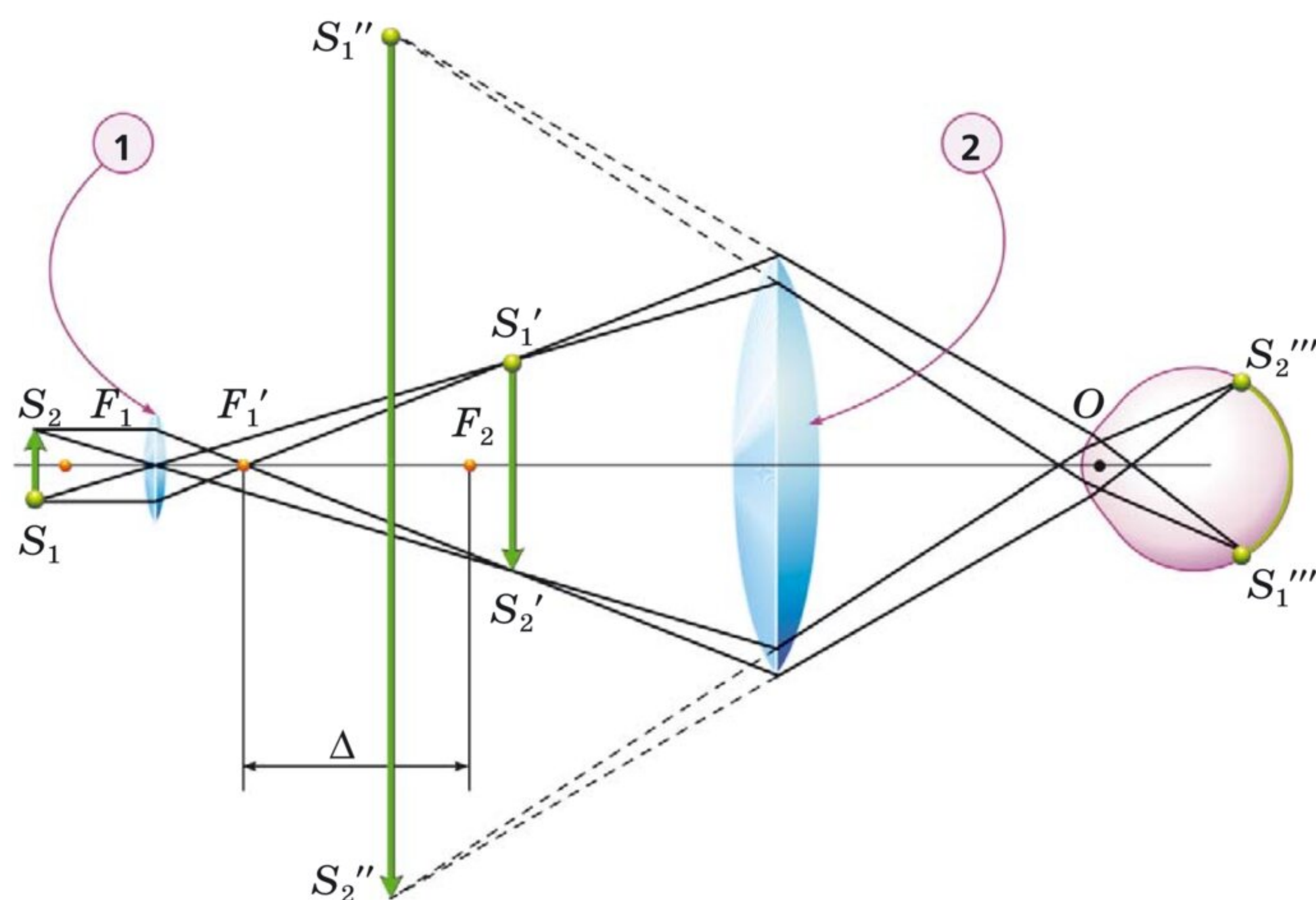
Как получается изображение предмета с помощью лупы? Расстояние от лупы до рассматриваемого предмета должно быть чуть меньше фокусного. Тогда изображение этого предмета оказывается мнимым, прямым и увеличенным. Разберём ход лучей при рассматривании небольшого предмета через лупу. Обозначим F и F' — фокусы линзы и O — оптический центр глаза. Мнимое изображение точки S предмета l , полученное после прохождения исходящих из неё лучей через лупу, обозначим S_1 . Размер получившегося изображения — l' . При этом лучи, исходящие из точки S , преломляются сначала в лупе, затем в преломляющих средах глаза и собираются в точке S_2 на сетчатке. В той же точке S_2 собрались бы лучи, если бы лупы не было, а сам источник находился бы в точке S_1 и имел бы размер l' .

Лучи, изображённые пунктиром, в действительности не существуют, так как мнимое изображение, полученное при их помощи, не испускает и не отражает световые лучи.

Ощущение того, что мы «видим» предмет l' , возникает потому, что глаз автоматически «восстанавливает» ход попавших в него лучей, а лучи после преломления в лупе попадают в глаз так, как если бы изображение l' было реальным предметом.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Чтобы получить большие увеличения очень малых объектов, используют систему из двух или более линз. Такие системы линз применяют в приборах, называемых **оптическими микроскопами** (от греч. *mikros* — малый и *skopeo* — смотрю). Оптическая система микроскопа состоит из двух частей: объектива (обращённого к объекту) и окуляра (обращённого к глазу). Небольшие линзы объектива подводятся близко к образцу. Объектив даёт действительное перевернутое увеличенное изображение предмета.



Небольшой предмет S_1S_2 располагается перед объективом **1** микроскопа на расстоянии, немного большем фокусного расстояния объектива F_1 . После прохождения световых лучей через объектив получается действительное перевернутое изображение $S_1'S_2'$ предмета, которое находится между окуляром **2** и его передним фокусом F_2 . Это изображение рассматривается глазом через окуляр, как через лупу; на сетчатке глаза образуется изображение $S_1'''S_2'''$, которое воспринимается глазом как исходящее от мнимого увеличенного изображения $S_1''S_2''$, расположенного на расстоянии наилучшего видения.

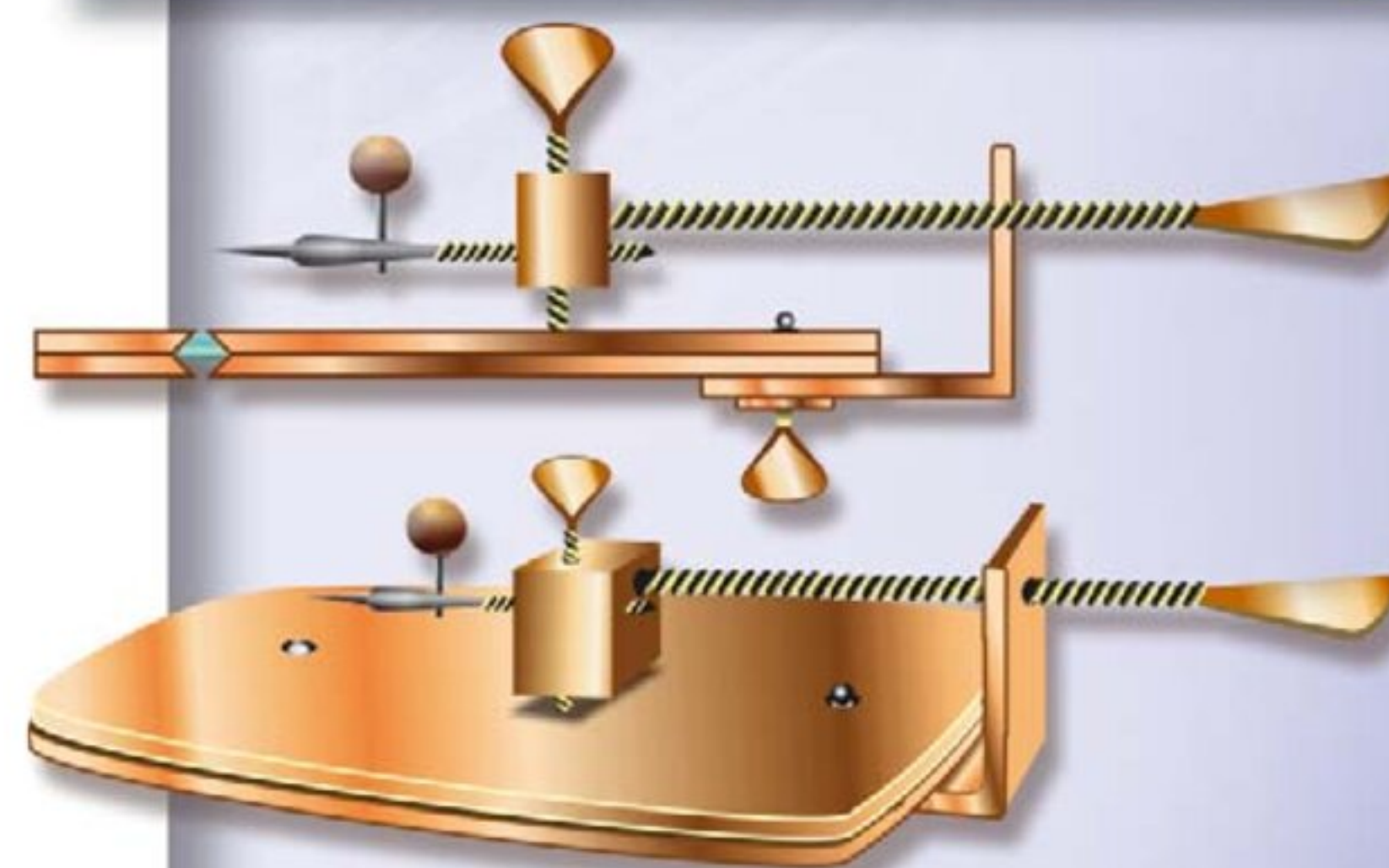


Имя первого изобретателя микроскопа не известно. Считается, что в конце XVI в. в Нидерландах потомственные оптики Захарий и Ханс Янсены смонтировали две выпуклые линзы внутри одной трубки, т.е. фактически создали первый микроскоп. В 1609 г. Галилео Галилей разработал составной микроскоп с выпуклой и вогнутой линзами. Считается, что первым, кто сумел привлечь к микроскопу внимание биологов, является Антон ван Левенгук (1632—1723). Его микроскопы представляли собой очень небольшие изделия с одной очень сильной линзой.

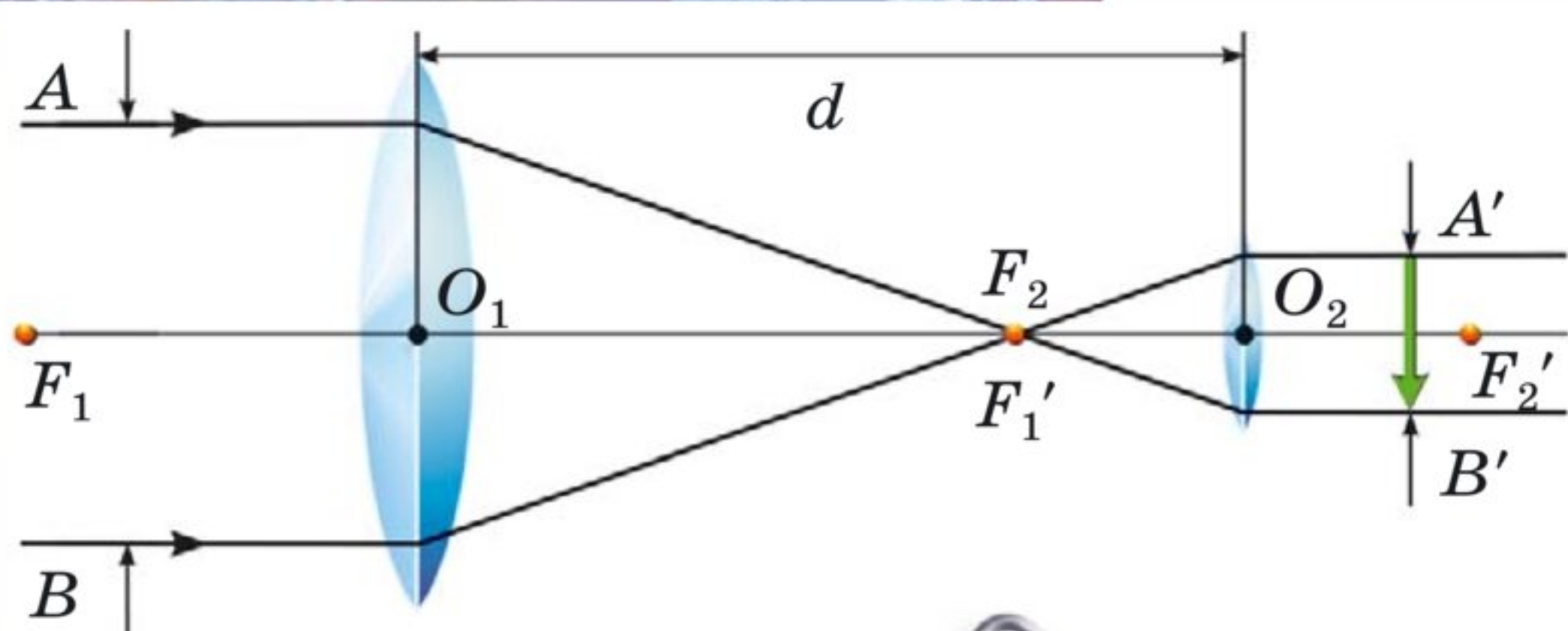


Увеличение микроскопа значительно больше увеличения, даваемого объективом или окуляром. Увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива и увеличения окуляра, поэтому нередко применяют микроскопы с увеличением около 1000 и даже больше.

Микроскопы — незаменимое оптическое оборудование в таких областях деятельности, как медицина, биология, ботаника, электроника и геология. С их помощью проводят исследования, на результатах которых основываются научные открытия, ставится правильный диагноз и разрабатываются новые препараты.



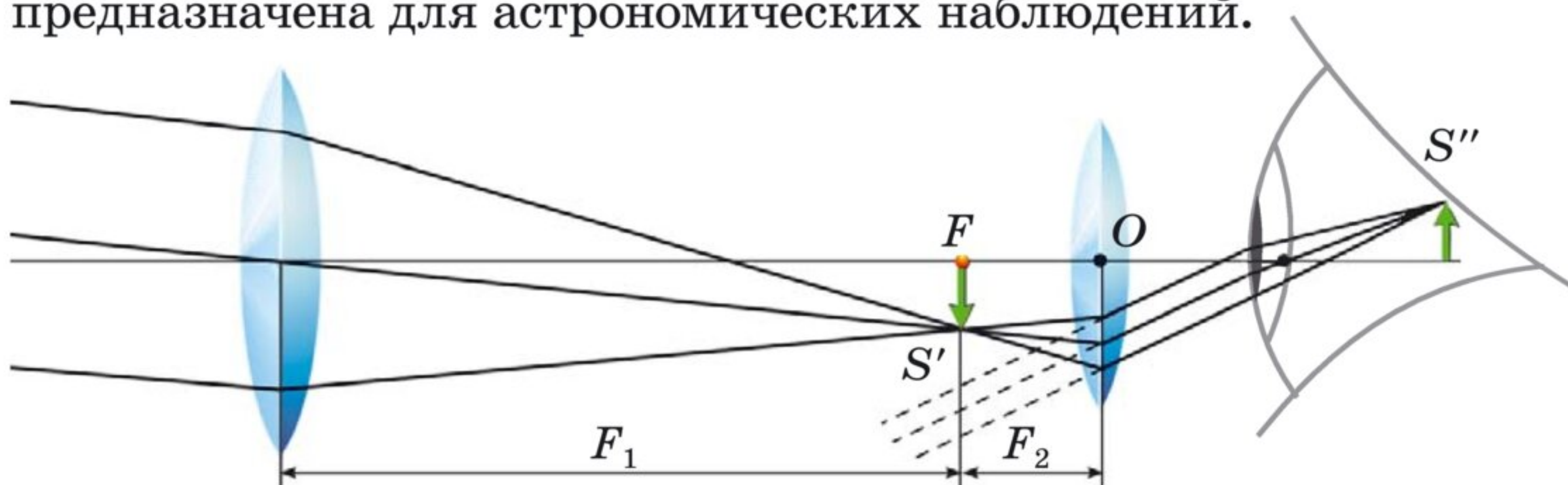
Простой микроскоп
А. Левенгука



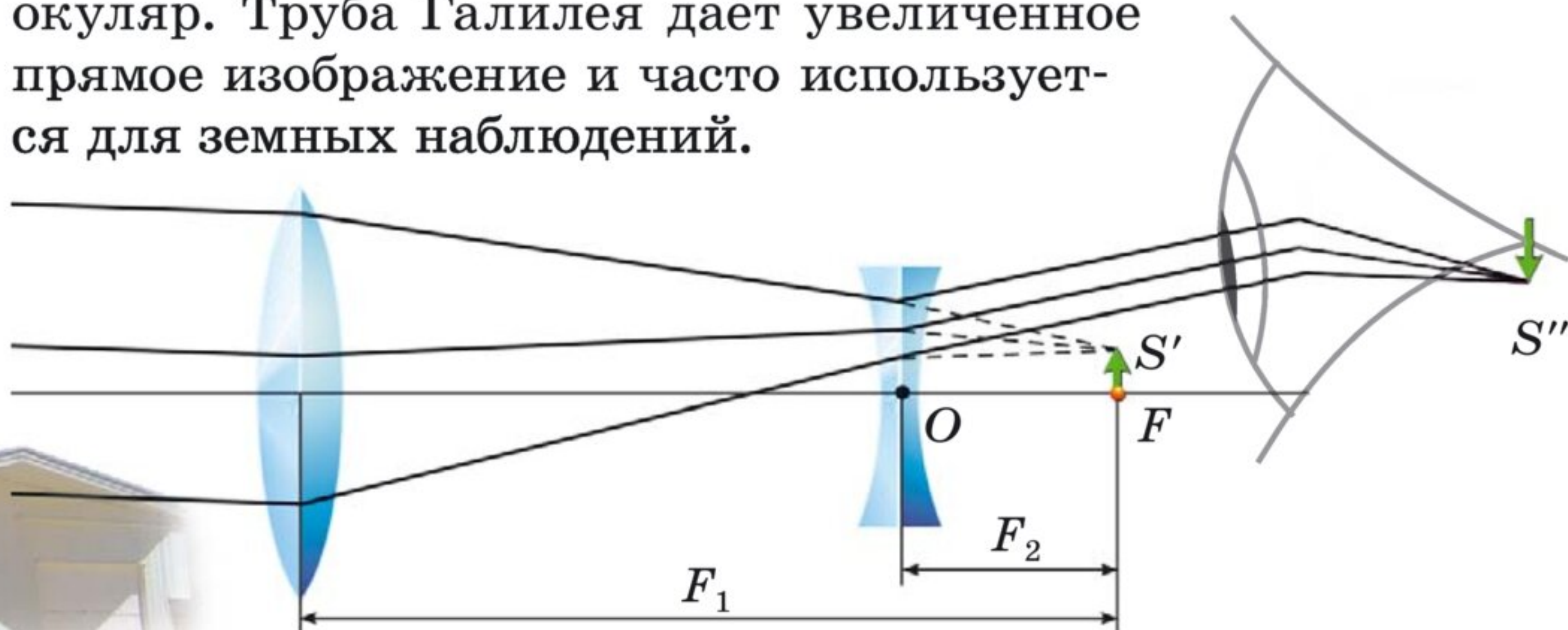
Современные телескопы представляют собой большие и сложные сооружения со множеством различных частей и механизмов. Большую роль в усовершенствовании телескопов сыграли успехи в производстве оптического стекла, искусстве шлифовки и полировки оптических поверхностей, общее развитие техники, а также различные открытия учёных-оптиков. Была изобретена фотография, которая значительно расширила возможности астрономических исследований и внесла большие изменения в конструкцию телескопов.

ТЕЛЕСКОПЫ или зрительные трубы предназначены для наблюдения удалённых объектов. Как и микроскоп, они состоят из двух линз — обращённой к предмету собирающей линзы с большим фокусным расстоянием (объектив) и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляр), обращённой к наблюдателю. Объектив зрительной трубы должен быть собирающей линзой. Окуляр может быть как собирающей, так и рассеивающей линзой. В зависимости от типа окуляра различают зрительную трубу Кеплера и зрительную трубу Галилея.

ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА КЕПЛЕРА Зрительную трубу с собирающей линзой в качестве окуляра называют **трубой Кеплера**. Труба изготовлена таким образом, что задний фокус F_1 объектива практически совпадает с передним фокусом окуляра F_2 . Линза объектива формирует действительное уменьшенное и перевёрнутое изображение бесконечно удалённого предмета, которое рассматривается в окуляр, как в лупу. При этом формируется мнимое увеличенное изображение. Поскольку изображение остаётся перевёрнутым, труба Кеплера неудобна для земных наблюдений и обычно предназначена для астрономических наблюдений.



ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА ГАЛИЛЕЯ Зрительную трубу с рассеивающей линзой в качестве окуляра называют **трубой Галилея**. В этой трубе задние главные фокусы F_1' объектива и F_2' окуляра совпадают. Параллельные пучки лучей, идущие от некоторой точки очень удалённого предмета (например, от точки A), сформировали бы её изображение A' в фокальной плоскости объектива. Поскольку эти лучи падают на рассеивающую линзу, то после преломления в ней лучи становятся параллельными и дают мнимое изображение h'' удалённого предмета в бесконечности. Глаз наблюдателя рассматривает это изображение в окуляр. Труба Галилея даёт увеличенное прямое изображение и часто используется для земных наблюдений.



космический
телескоп
«Хаббл»

зрительные
трубы
Галилея

«Большой
телескоп
Канарских
островов»

ФОТОАППАРАТ Линзы являются главной частью ещё одного прибора — *фотоаппарата*, который позволяет получать изображения различных объектов на светочувствительной фотоплёнке или пластинке (в цифровых фотоаппаратах). В процессе **фотографирования** (от греч. *photos* — свет и *graphe* — письмо) линза проецирует изображение объекта съёмки на поверхность, покрытую светочувствительным слоем. Это изображение должно быть уменьшенным и действительным, так как мнимое изображение не может воздействовать на светочувствительный состав. Такое изображение даёт собирающая линза, если предмет находится за двойным фокусом линзы.

С момента создания первого фотоаппарата основная схема его работы почти не изменилась. В настоящее время широкое распространение получили цифровые фотоаппараты. Они почти полностью заменили плёночные фотоаппараты, использовавшиеся вплоть до 90-х гг. XX в.

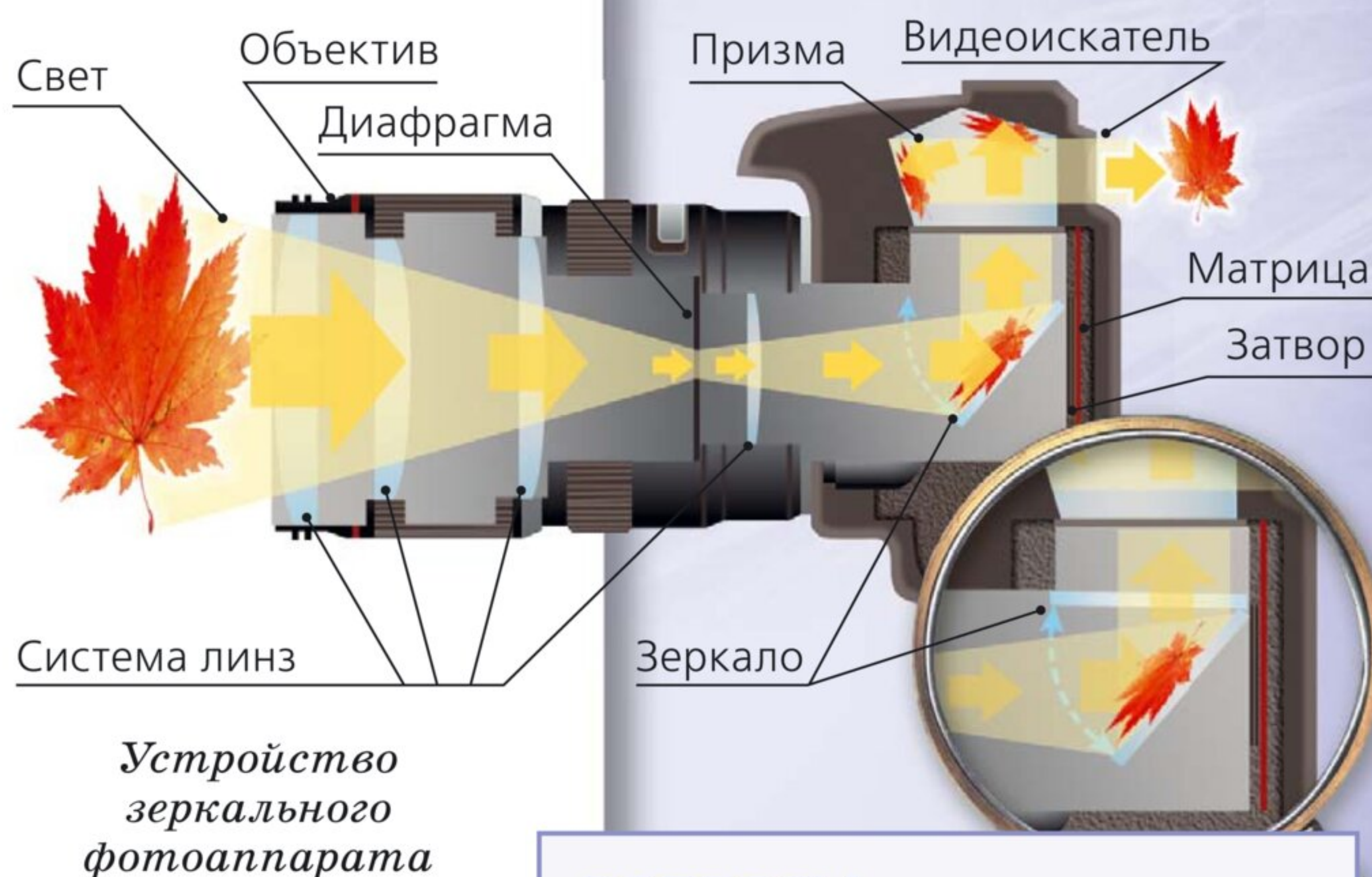


Первый фотоснимок сделал в 1826 г. французский инженер Жозеф Нисефор Ньепс, открывший способ сохранения полученного изображения путём обработки попадающего на поверхность из стекла света асфальтовым лаком. В 1835 г. английский физик Уильям Тальбот, изучая возможности камеры Ньепса, смог добиться улучшения качества изображений с помощью изобретённого им отпечатка фотографии — негатива. В 1889 г. в историю фотографии вошло имя Джорджа Истмана Кодака, который запатентовал первую фотоплёнку в виде рулона, а потом и фотокамеру «Кодак», сконструированную специально для фотоплёнки. В 1904 г. братья Люмьер начали выпускать пластины для цветного фото, они стали

основоположниками будущей цветной фотографии. В 1988 г. компания «Fujifilm» официально выпустила в продажу первый цифровой фотоаппарат. Первые попытки создать движущееся изображение датируются второй половиной XIX в. Первые кинокамеры имели множество объективов и затворов для ускоренной съёмки. Полученные отпечатки монтировались в просмотровое устройство, где они «прокручивались», создавая иллюзию движения. Сегодня существует аппаратура, которая называется киносъёмочной и кинопроекционной. Современное профессиональное кино снимают со скоростью 24 кадра в секунду. Эта скорость является достаточной для создания ощущения непрерывного движения.

Основной частью фотоаппарата является объектив — линза или система линз. Он помещается в передней части светонепроницаемой камеры. Объектив можно плавно перемещать относительно плёнки для получения на ней чёткого изображения предмета. Во время фотографирования объектив открывают при помощи специального затвора, и изображение попадает на *светочувствительную плёнку*.

Корпус современного цифрового фотоаппарата — это светонепроницаемая коробка, внутри которой расположена чувствительная к свету *матрица* фотоаппарата. Кроме неё, в корпус вмонтирована вся управляющая электроника, глазок видоискателя и другие элементы. На корпусе установлен *объектив*, представляющий собой конструкцию с набором линз. Основным препятствием для света на пути к матрице является *затвор* — сложное техническое устройство, при срабатывании которого световой поток попадает на матрицу.



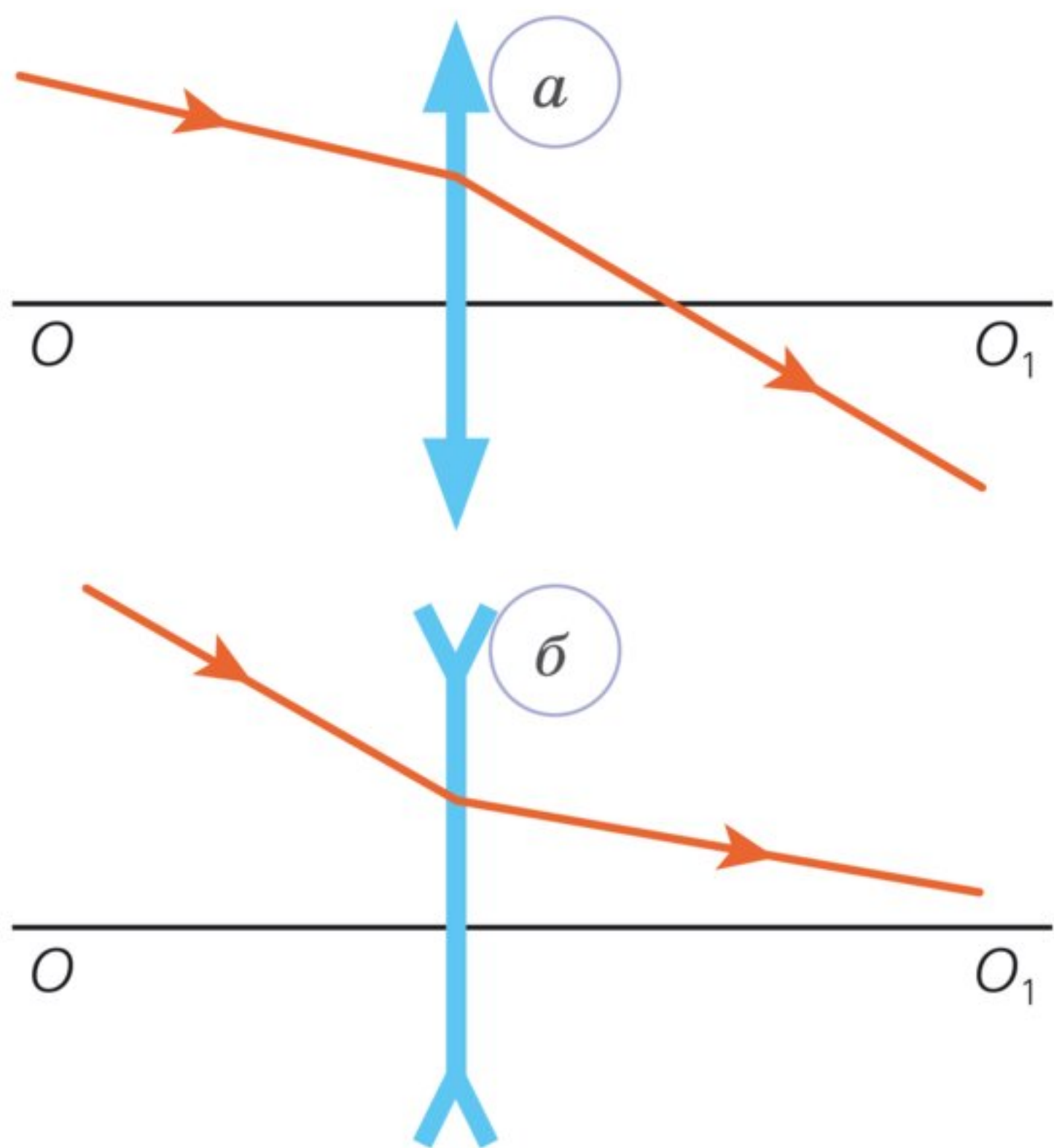
ВОПРОСЫ:

- В чём различия зрительной трубы Кеплера и зрительной трубы Галилея?
- Из каких основных частей состоит фотоаппарат?
- В чём заключается принцип действия микроскопа?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

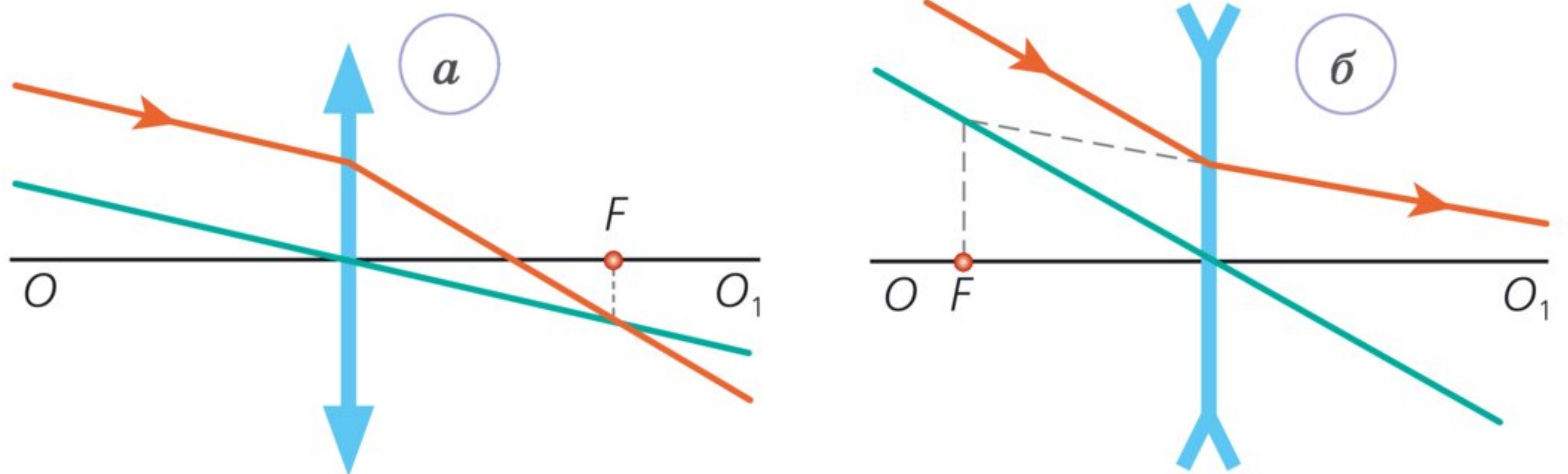
- Как решать задачи на прохождении светового луча через призму.
- Как решать задачи на вычисление показателя преломления.
- Как решать задачи на формулу тонкой линзы.



ЗАДАЧА 1 На рисунках даны положения главной оптической оси OO_1 , оптического центра собирающей и рассеивающей линз и ход произвольного луча. Найдите построением положения главных фокусов линз.

Решение:

Для каждого из случаев *a* и *б* проведём побочную оптическую ось, параллельную падающему лучу и проходящую через оптический центр линзы. Точка пересечения побочной оптической оси с преломлённым лучом (для собирающей линзы *a*) или с продолжением преломлённого луча (для рассеивающей линзы *б*) лежит в фокальной плоскости линзы. Опустив перпендикуляр из точки пересечения на оптическую ось, находим положение главного фокуса.



Побочная оптическая ось линзы — это прямая, которая проходит через оптический центр линзы и не совпадает с её главной оптической осью.

Фокальная плоскость — это плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси.

ЗАДАЧА 2 Луч света падает под углом 40° на треугольную стеклянную призму с преломляющим углом 60° . Определите, под каким углом луч света выходит из призмы. Показатель преломления стекла равен 1,5.

Дано:

$$\varphi = 60^\circ$$

$$\alpha = 40^\circ$$

$$n = 1,5$$

$\gamma' = ?$

Решение:

Построим ход лучей через призму. Луч света падает на призму под углом α к перпендикуляру, построенному к грани AB . Затем луч преломляется (обозначим угол преломления как γ) и идёт по прямой до грани BC .

Обозначим угол падения на грань BC призмы как α' . После преломления луч света выходит под углом γ' .

Запишем закон преломления для падающего луча на грани AB :

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \rightarrow \sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n};$$

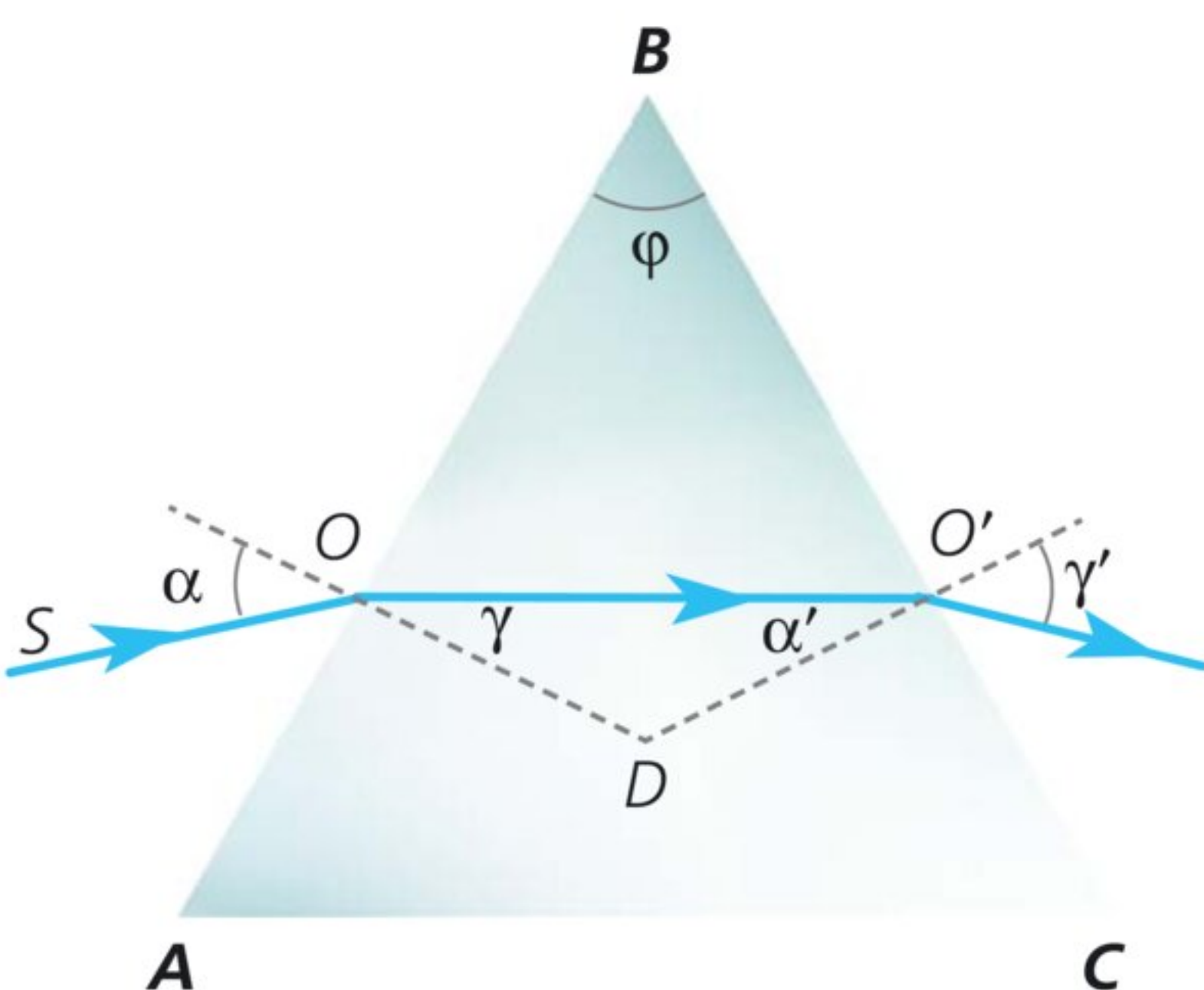
$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\sin 40^\circ}{1,5}\right) \approx 25^\circ.$$

В четырёхугольнике $OBO'D$ углы $\angle BOD$ и $\angle BO'D$ прямые, поэтому угол $\angle ODO' = 180^\circ - \varphi = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$.

Из треугольника $\triangle ODO'$ найдём угол α' :

$$\alpha' = 180^\circ - \angle ODO' - \gamma;$$

$$\alpha' = 180^\circ - 120^\circ - 25^\circ = 35^\circ.$$



Запишем закон преломления для грани BC :

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \gamma'} \rightarrow \sin \gamma' = n \sin \alpha';$$

$$\gamma' = \arcsin(1,5 \cdot \sin 35^\circ) \approx 59^\circ.$$

Ответ: $\gamma' \approx 59^\circ$.

ЗАДАЧА 3 Найдите показатель преломления некоторого вещества, если предельный угол полного отражения для границы вещество—вода равен 33° . Определите, что это за вещество.

Дано:
 $\alpha_0 = 33^\circ$
 $n_2 = 1,33$

$n_1 = ?$

Решение:

По закону Снелля $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$.

Следовательно,

$$n_1 = \frac{n_2}{\sin \alpha_0}; \quad n_1 = \frac{1,33}{\sin 33^\circ} = 2,4.$$

По таблице показателей преломления различных веществ находим, что 2,4 соответствует алмазу.

Ответ: $n_1 = 2,4$; алмаз.

ЗАДАЧА 4 Предмет находится на расстоянии 2 м от экрана. На каком расстоянии от предмета нужно поставить собирающую линзу, чтобы получить на экране изображение предмета, увеличенное в 3 раза? Чему равно фокусное расстояние линзы?

Дано:
 $L = 2 \text{ м}$
 $\Gamma = 3$

$d = ?$
 $F = ?$

Решение:

Увеличение линзы $\Gamma = \frac{f}{d}$, а $L = f + d$, поэтому

составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} f + d = L \\ \frac{f}{d} = \Gamma \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим, что

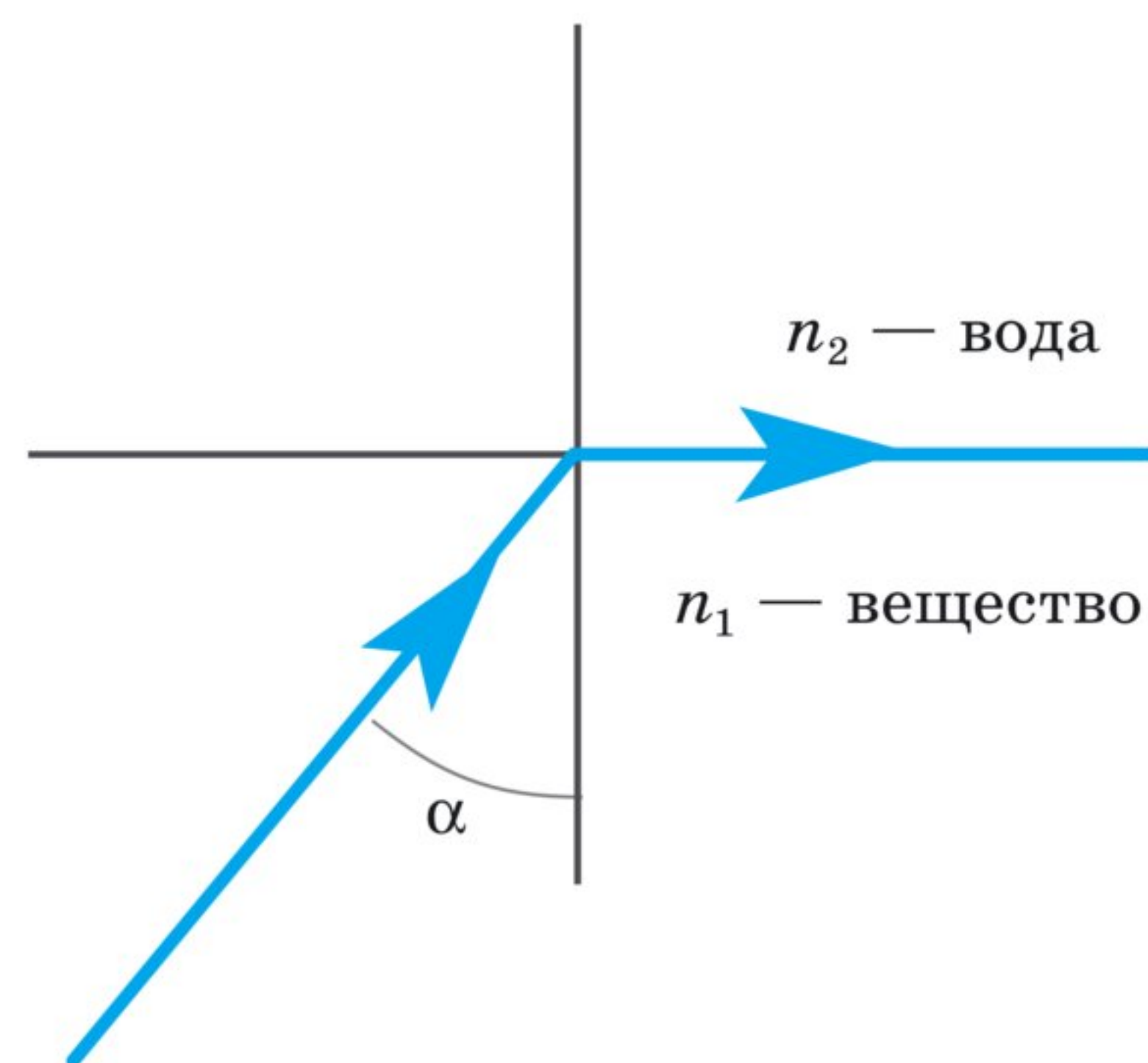
$$d = \frac{L}{\Gamma + 1} = 0,5 \text{ м}, \quad f = \Gamma d = 1,5 \text{ м}.$$

В соответствии с формулой тонкой линзы $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.

Откуда находим $F = \frac{df}{d+f}$;

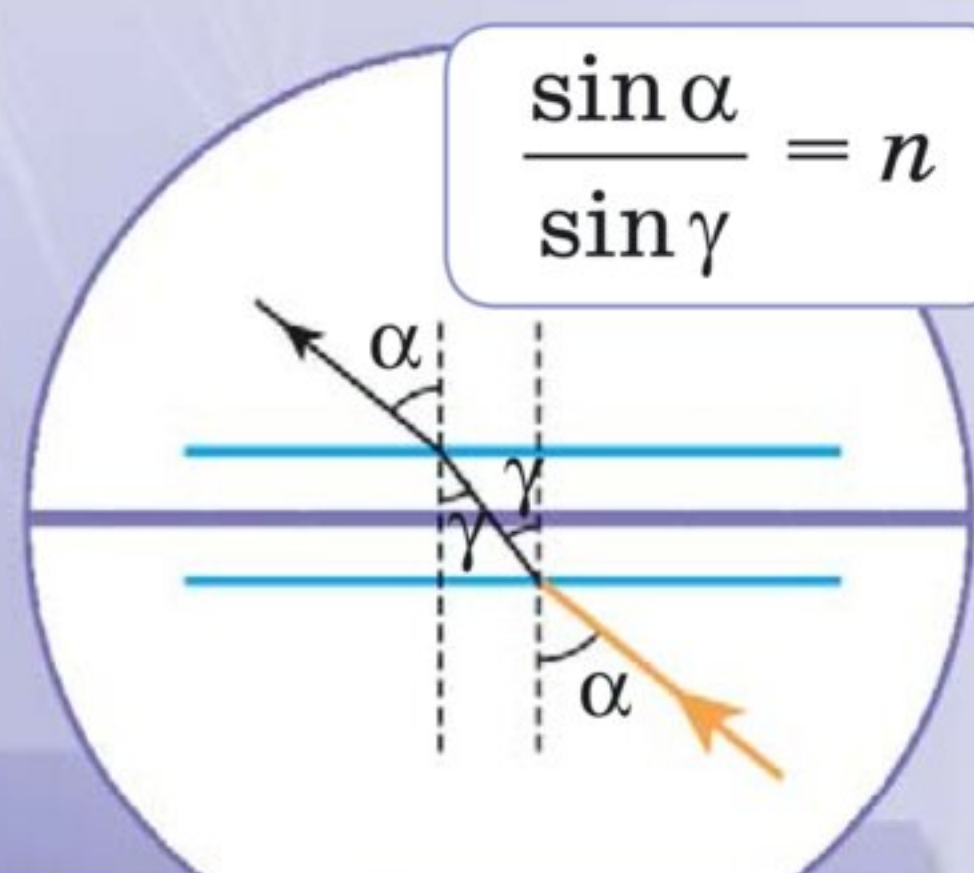
$$F = \frac{0,5 \cdot 1,5}{0,5 + 1,5} = 0,375 \text{ м} = 37,5 \text{ см}.$$

Ответ: $d = 0,5 \text{ м}$; $F = 37,5 \text{ см}$.





ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА



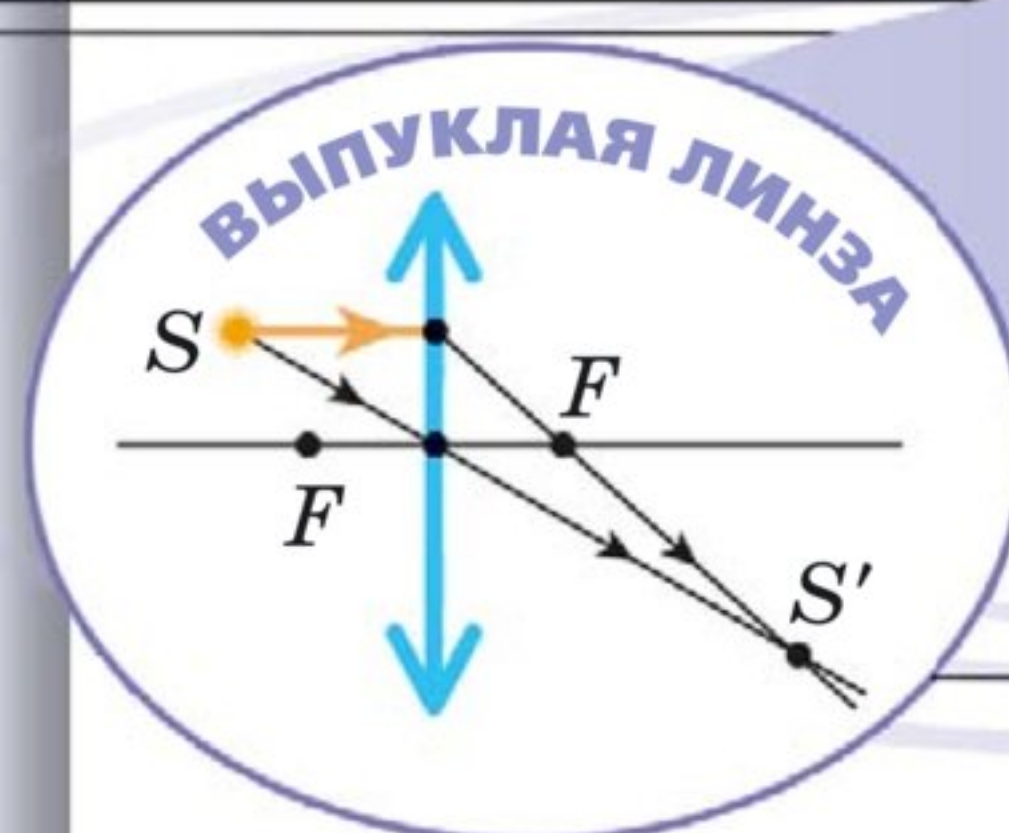
ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ



ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ

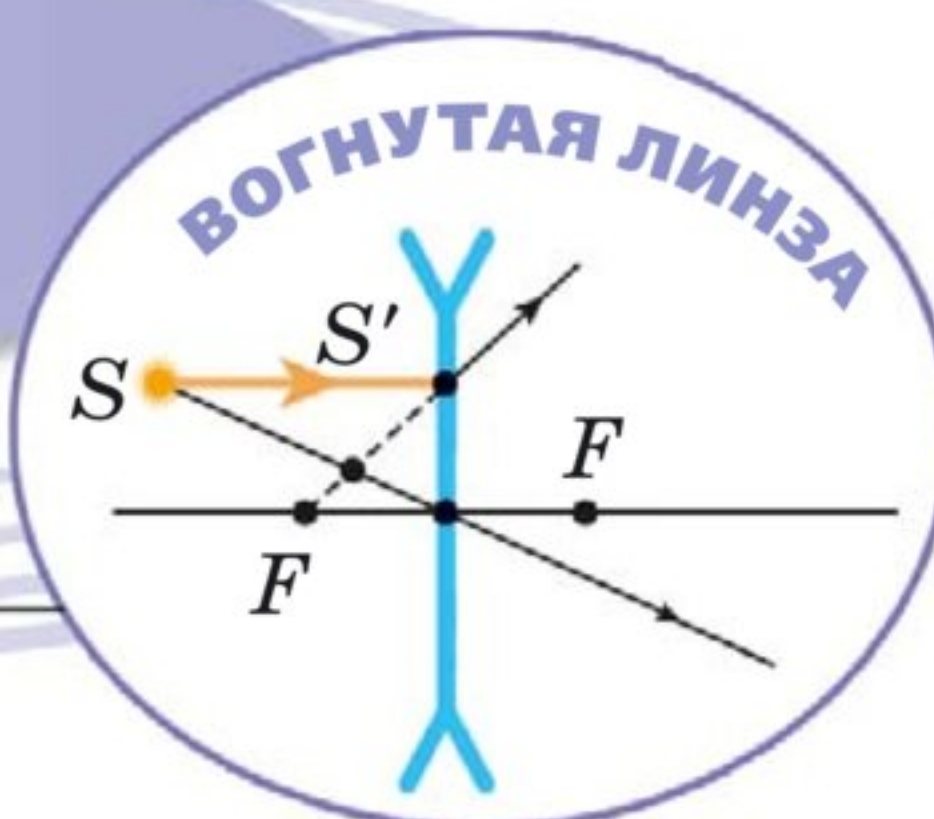
ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.
- Луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности, восстановленным в точке падения луча. Угол падения светового луча равен углу отражения.
- Световые пучки небольшой интенсивности, пересекаясь, не влияют друг на друга.
- При переходе светового луча из одной среды в другую происходит его преломление — изменение направления распространения света.
- Если луч света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения.
- Если угол падения больше предельного угла, возникает явление полного внутреннего отражения.
- Оптические приборы (зеркала, линзы, микроскопы) позволяют получать изображения различных объектов.



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$



ПОДРОБНЕЕ...

Гулиа Н.В. Удивительная физика: О чём умолчали учебники. / Н. В. Гулиа. — М.: ЭНАС, 2008.

Перельман Я.И. Занимательная физика. Кн. 1. / Я. И. Перельман. — М.: Римис, 2009.

Тит Том. Продолжаем научные забавы: Интересные опыты, фокусы, самоделки. / Том Тит. — М.: ИД Мещеракова, 2007.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как известно, плоское зеркало создаёт мнимое изображение предметов. Однако при некотором условии плоское зеркало может дать и действительное изображение. Что это за условие?
- В каких случаях от предмета образуется только тень, а в каких случаях — полутень? Возможно ли образование только полутени?
- Если смотреть сверху вниз на поднимающийся со дна водоёма воздушный пузырёк, то он будет выглядеть блестящим. Почему это происходит?
- Как следует расположить две линзы, одна из которых рассеивающая, а другая собирающая, чтобы параллельные лучи, пройдя через них, остались параллельными?

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Музей оптики
<http://gotourl.ru/13737>



Глава 7

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ. ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ

- СКОРОСТЬ СВЕТА
- ДИСПЕРСИЯ СВЕТА
- ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА.
ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ
И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН
- ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА
- ДИФРАКЦИЯ СВЕТА
- ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ
И ДИФРАКЦИИ СВЕТА
- ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН.
ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА
- ЦВЕТ
- ВИДЫ СПЕКТРОВ.
СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
- СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ III



ОПТИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений.

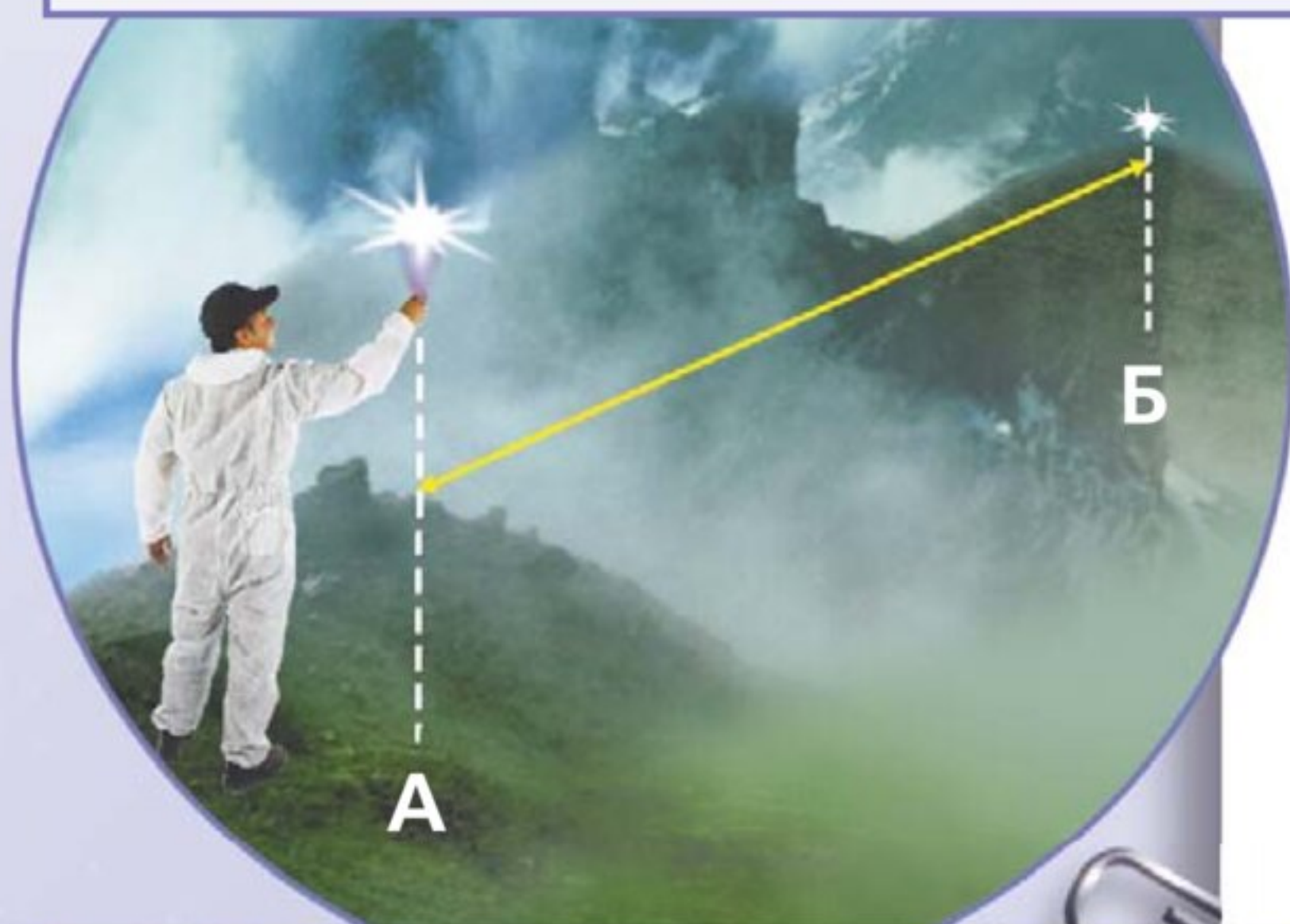
Дж. Максвелл

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие опыты сыграли большую роль в определении скорости света.
- Чему равна скорость света в вакууме.

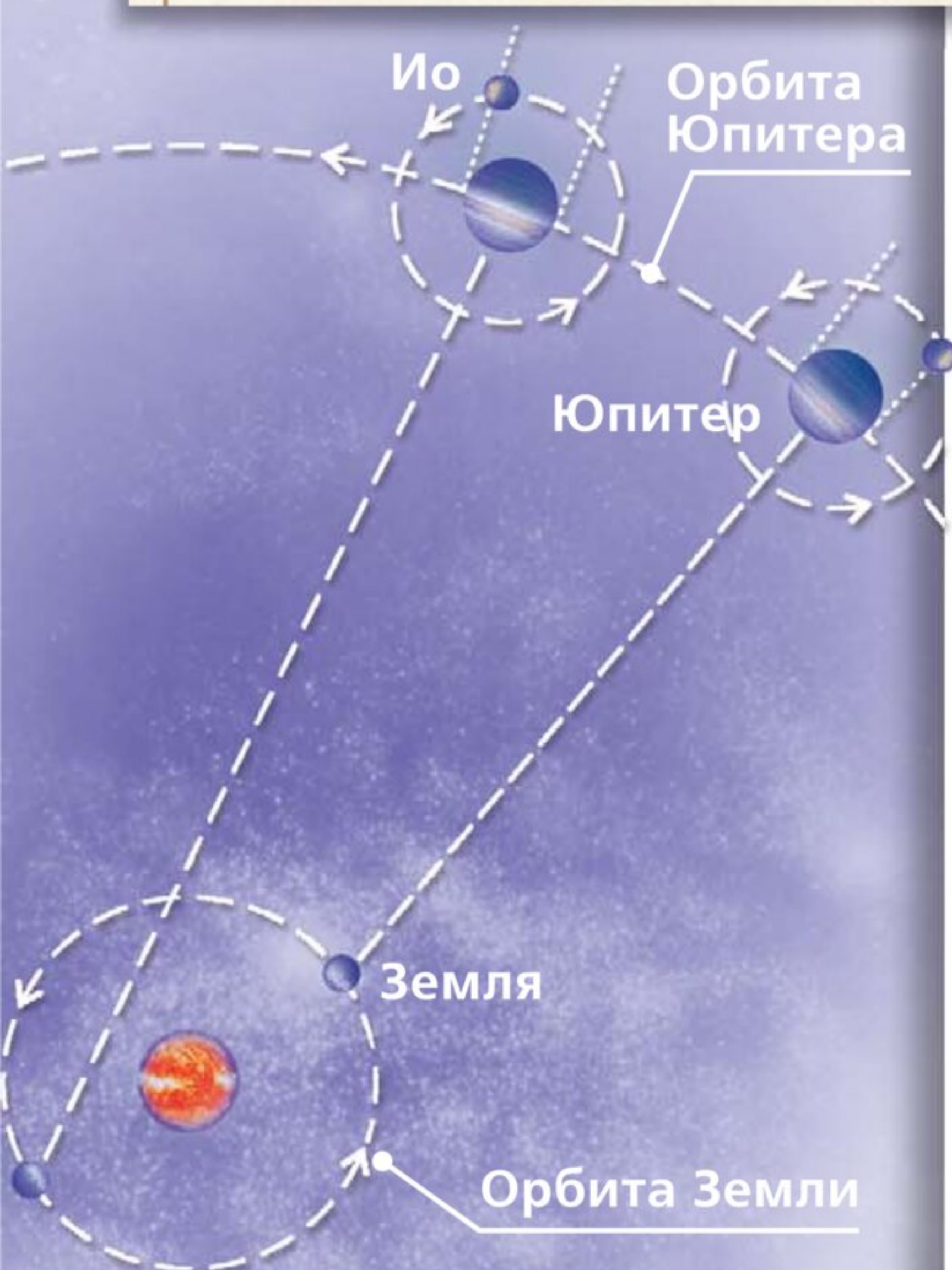
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое показатель преломления среды?



Галилей сформулировал проблему определения скорости света, но он не разрешил её. Формулировка проблемы часто более существенна, чем её разрешение, которое может быть делом лишь математического или экспериментального искусства.

А. Эйнштейн

**СКОРОСТЬ СВЕТА**

Большинство учёных вплоть до XVII в. считало, что свет распространяется мгновенно или, другими словами, что скорость света бесконечна. Эти взгляды опирались на мнение одного из главных авторитетов в науке того времени — Аристотеля. Среди европейских учёных Нового времени Галилей был одним из первых, кто полагал скорость света конечной и предложил эксперимент по её измерению.

ОПЫТ ГАЛИЛЕЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКОРОСТИ СВЕТА

Первый исторически известный эксперимент по определению скорости света был выполнен Галилеем. Идея опыта достаточно проста. Два наблюдателя *А* и *Б* с фонарями располагались на вершинах двух холмов на расстоянии нескольких километров друг от друга. В некоторый момент наблюдатель *А* открывал свой фонарь и в этот же момент начинал отсчёт времени. Другой наблюдатель, увидев свет, посылал световой сигнал своим фонарём обратно наблюдателю *А*. Когда первый наблюдатель видел свет фонаря *Б*, он тотчас заканчивал отсчёт времени. При этом временной интервал между посылкой и приёмом сигнала наблюдатель *А* измерял по числу ударов пульса. Скорость света определялась как отношение двойного расстояния между наблюдателями к промежутку времени между посылкой и приёмом сигнала. Очевидно, что столь несовершенный метод не мог дать сколько-нибудь надёжную оценку скорости света. По-видимому, это хорошо понимал и сам Галилей.

ОПЫТ РЁМЕРА ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКОРОСТИ СВЕТА

Впервые определить скорость света удалось в 1676 г. датскому астроному О. Рёмеру. Успех опыта Рёмера в решающей степени объяснялся тем, что он использовал астрономический метод определения скорости света, и расстояния, проходимые светом в его измерениях, были поистине огромными. Рёмер наблюдал затмения Ио — одного из спутников Юпитера. Так как орбиты Земли, Юпитера и спутника Ио лежат в одной плоскости, то Рёмер в телескоп хорошо видел, как спутник проходил перед планетой, а затем исчезал из поля зрения, заходя в её тень. Через некоторое время Ио вновь появлялся в поле зрения в виде крохотной звёздочки. Промежуток времени между двумя последовательными появлениями Ио составил 42 ч 28 мин 36 с.

Сначала Рёмер провёл измерения в то время, когда положения Земли и Юпитера на орбитах соответствовали их максимальному сближению. Примерно через полгода Рёмер повторил наблюдения затмения Ио, когда Земля удалилась от Юпитера на расстояние, равное диаметру своей орбиты. В этот раз Ио в поле зрения телескопа появился на 22 мин позже, чем тогда, когда положение Земли на орбите было диаметрально противоположным.

Рёмер понял, что задержка наступления затмения равна времени, которое потребовалось свету, чтобы пройти расстояние, равное диаметру земной орбиты. Разделив это расстояние на время запаздывания, Рёмер получил значение скорости света, примерно равное 230 000 км/с.

Это значение скорости света было огромным, но всё же конечным. Это и есть главный результат опыта Рёмера.

ОПЫТ ФИЗО Первым лабораторным методом по определению скорости света был опыт французского физика А. Физо, поставленный им в 1849 г. Метод Физо в общих чертах напоминал метод Галилея, только роль наблюдателя А выполняло вращающееся зубчатое колесо, а роль наблюдателя В — плоское зеркало. Узкий световой пучок от источника после отражения от полупрозрачной пластинки направлялся на кромку вращающегося зубчатого колеса. Пройдя в прорезь между зубцами, свет падал на отдалённое зеркало и, отразившись, возвращался назад. В этом опыте расстояние, проходимое светом, составляло более 8 км. Если за время движения светового луча от колеса до зеркала и обратно на месте прежней прорези появлялась новая прорезь, то наблюдатель в зрительной трубе видел свет. Если же за указанное время на месте прорези появлялся зубец, то свет в трубе не наблюдался. Зная частоту вращения колеса и измерив расстояние между колесом и зеркалом, Физо получил значение скорости света, равное 312 000 км/с.

МЕТОД МАЙКЕЛЬСОНА В другом, более точном лабораторном методе определения скорости света прерывание света осуществлялось при помощи быстро вращающегося стального восьмигранного зеркала в форме призмы. Такой опыт был выполнен в 1879 и 1926 гг. американским физиком А. Майкельсоном. Майкельсон установил вращающееся зеркало на вершине Маунт-Вильсон в Южной Калифорнии, а стационарное зеркало — на Маунт-Болди (Маунт-Сан-Антонио) на расстоянии 35 км. Световой пучок от источника направлялся на грань призмы и после отражения падал на вогнутое зеркало, установленное на горе. Отражённый от зеркала луч направлялся на такое же зеркало, установленное на вершине другой горы. Отражённый в обратном направлении свет вновь падал на грань призмы и после отражения попадал в объектив зрительной трубы. При этом свет проходил суммарное расстояние, равное 70,7 км, за $\frac{1}{8}$ оборота призмы. Зная частоту вращения призмы, Майкельсон получил значение скорости света, которое лишь незначительно отличается от общепринятого:

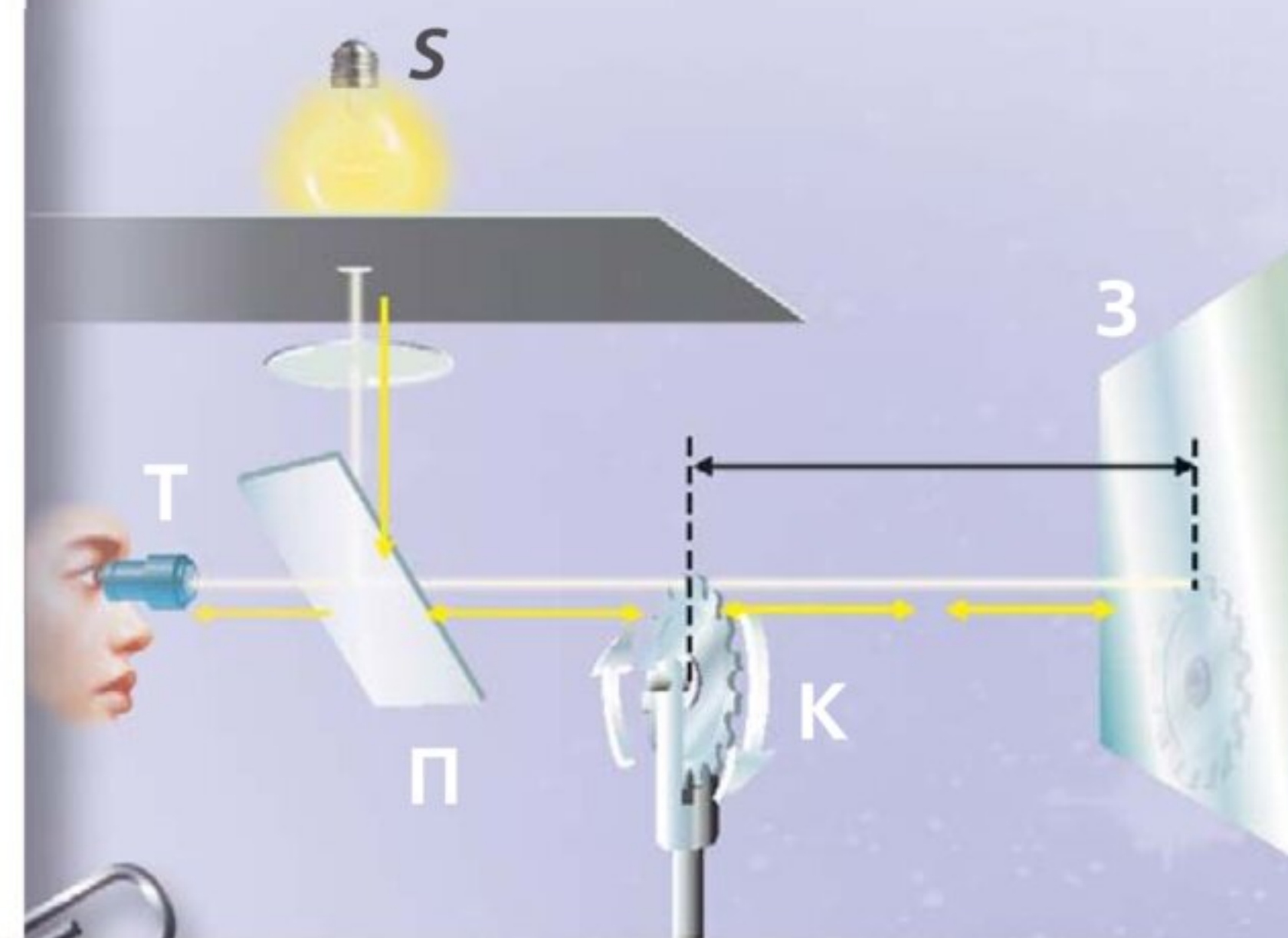
$$c = 299\,792 \text{ км/с.}$$

Принятое в настоящее время значение скорости света c в вакууме составляет

$$c = (2,9979246 \pm 0,00000001) \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Обычно это значение округляют до

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$



Скорость света в среде зависит от свойств среды. Например, скорость света в воде оказалась в 1,33 раза меньше, чем в воздухе. Поскольку 1,33 — показатель преломления воды, то отсюда следует, что скорость света зависит от показателя преломления среды.



ВОПРОСЫ:

- В чём состоял метод Рёмера по измерению скорости света?
- В чём состоял метод Физо по измерению скорости света?
- В чём состоял метод Майкельсона по измерению скорости света?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие опыты привели к открытию дисперсии света.
- Что такое дисперсия.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон преломления света?
- В чём физический смысл показателя преломления среды?

В середине XVII в. большой трудностью для учёных было объяснение цветового богатства окружающего мира. «Всё богатство цветов в природе впервые объяснил всё тот же гениальный Ньютон», — писал А. Эйнштейн. Свой знаменитый труд «Оптика» Исаак Ньютон начинает со слов: «Моё намерение в этой книге — не объяснять свойство света гипотезами, но изложить и доказать их рассуждением и опытами».

РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА НА ЦВЕТА

В 1666 г. Ньютон, занимаясь усовершенствованием телескопов, обратил внимание на тот факт, что изображение, получаемое с помощью объектива телескопа, окрашено по краям.

Предполагая, что это может быть связано с преломлением света, он направил узкий пучок солнечного света, образованного малым отверстием в ставне, на грань стеклянной призмы, установленной в затемнённой комнате. На противоположной стене комнаты, выполнявшей роль экрана, появилось удлинённое изображение щели в виде цветной полосы, содержащей семь цветов радуги: фиолетовый, синий, голубой, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. Получившуюся на экране цветную полосу Ньютон назвал спектром.

В опытах, поставленных Ньютоном, красные лучи отклонялись от первоначального направления слабее всего, а фиолетовые — сильнее всего.

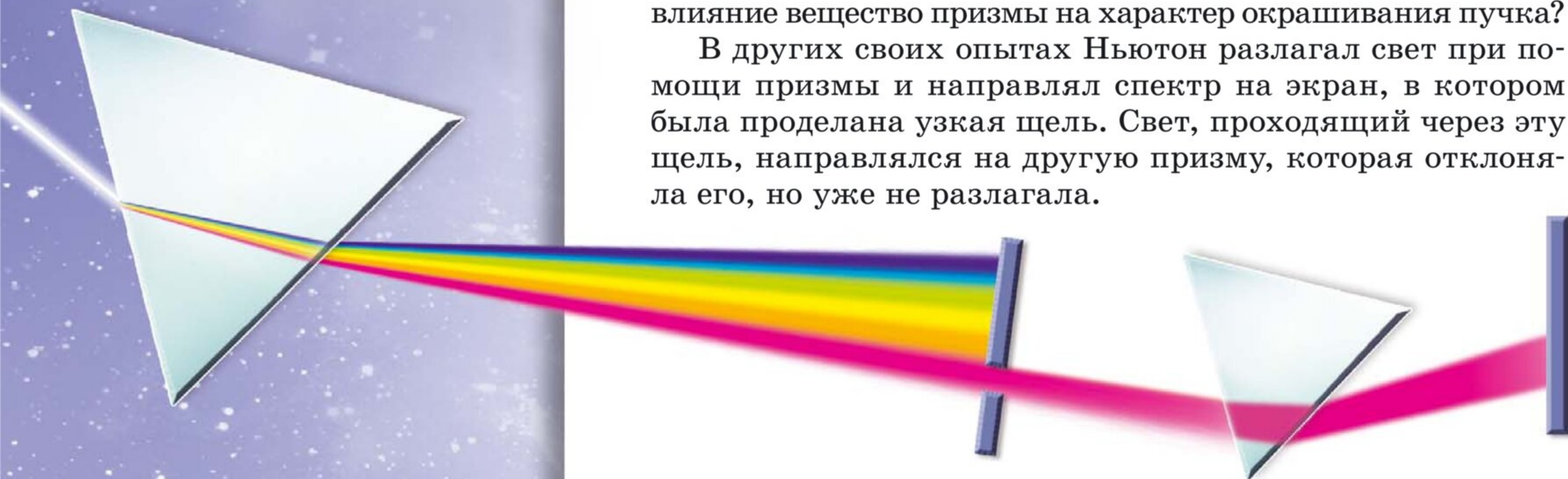
Отклонение луча света, проходящего через призму, зависит от угла между гранями, через которые проходит свет, от направления луча, падающего на первую грань, и от показателя преломления вещества призмы. Из этих трёх величин различаться для разных цветов может только показатель преломления.

Из опыта следовало, что белый свет является сложным: пройдя через призму, он разлагается на пучки различных цветов. Ньютон писал: «Лучи, различающиеся по цвету, различаются и по степени преломляемости».

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Опыты Ньютона убедительно свидетельствовали о том, что белый свет имеет сложную структуру. Вместе с тем Ньютона интересовал вопрос: оказывает ли влияние вещество призмы на характер окрашивания пучка?

В других своих опытах Ньютон разлагал свет при помощи призмы и направлял спектр на экран, в котором была проделана узкая щель. Свет, проходящий через эту щель, направлялся на другую призму, которая отклоняла его, но уже не разлагала.



Эти опыты позволили Ньютону сформулировать понятие однородного света: «Всякий однородный свет имеет собственную окраску, отвечающую степени его преломляемости, и такая окраска не может изменяться при отражениях и преломлениях».

Зависимость показателя преломления среды от цвета световых лучей Ньютон назвал **дисперсией**.

Как известно, показатель преломления среды зависит от скорости света v в веществе: $n = c/v$, где c — скорость света в вакууме.

Следовательно, пучок фиолетового цвета преломляется в большей степени потому, что фиолетовый цвет имеет в веществе наименьшую скорость. Красные же лучи преломляются меньше других потому, что их скорость в веществе наибольшая.

ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ВОКРУГ НАС Одним из наиболее известных примеров дисперсии света является радуга. Её можно увидеть в небе после дождя или глядя на водопад, если солнце находится за спиной у наблюдателя.

В обоих этих случаях воздух наполнен мельчайшими капельками воды. Солнечные лучи, попадая на капельки воды, преломляются на её поверхности, а затем отражаются от внутренней поверхности и при выходе из капли в воздух преломляются ещё раз.

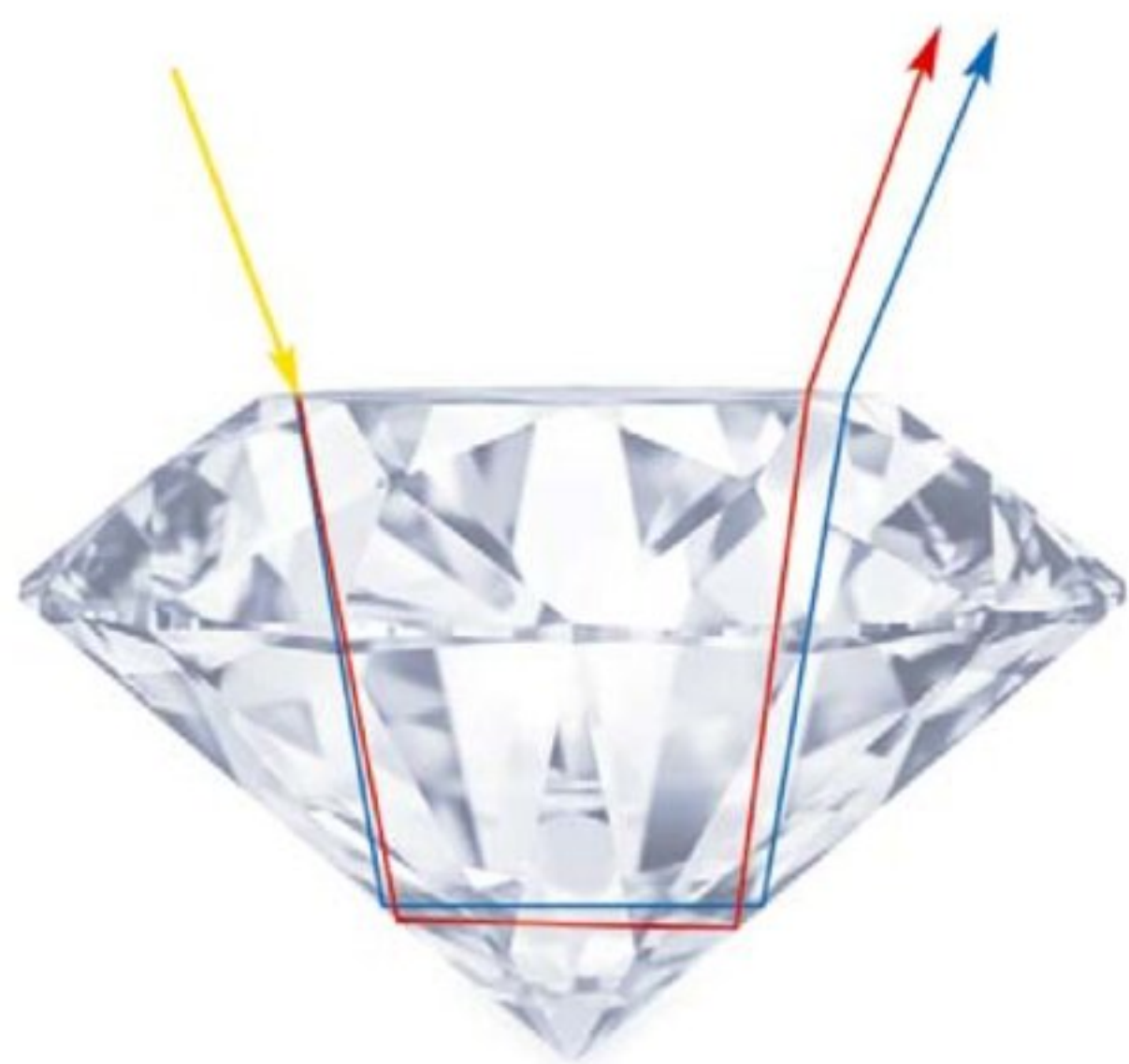
Угол преломления у красных лучей меньше, чем у фиолетовых, поэтому красные лучи попадают в глаз наблюдателя от капелек, находящихся на большей высоте. Именно поэтому верхняя дуга радуги всегда красная.

Все капли одного и того же цвета наблюдатель видит под одним и тем же углом, поэтому радуга имеет форму дуги окружности.

В основе сверкания бриллиантов лежат явления полного внутреннего отражения и дисперсии.

Бриллианты — это огранённые и отшлифованные алмазы, имеющие большой показатель преломления. Критический угол полного внутреннего отражения у бриллиантов составляет 25° .

Падающий на драгоценный камень свет испытывает многократное отражение от внутренних граней, прежде чем выйдет наружу. При этом луч света, проходящий внутри бриллианта, проходит достаточно большой путь для разделения цветов. Именно поэтому мы видим яркий блеск и радужные переливы цвета.



Не все современники Ньютона согласились с его выводами: слишком уж необычными они казались. Между тем Ньютон нашёл простой и убедительный способ доказательства справедливости своей теории. Для этого он на пути пучка, прошедшего через призму, поместил вторую призму, повернутую на 180° относительно первой. При этом вторая призма действовала как собирающая линза: вышедший из неё пучок в точке схождения лучей становился белым.



ВОПРОСЫ:

- В чём состояли опыты Ньютона по изучению дисперсии?
- Что такое дисперсия света?
- Почему мы видим радугу в небе после дождя?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключается принцип Гюйгенса.
- Объяснение закона отражения с использованием принципа Гюйгенса.
- Объяснение закона преломления с использованием принципа Гюйгенса.

ВСПОМНИТЕ:

- Закон отражения света.
- Закон преломления света.



Христиан Гюйгенс
(1629—1695)

Нидерландский учёный, математик, астроном и физик, один из основоположников теоретической механики, волновой оптики и теории вероятностей.

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН

Фундаментальные работы Ньютона по оптике, опубликованные в 1678 г., оказали большое влияние на Гюйгенса, который, с одной стороны, восхищался экспериментальной стороной работ Ньютона, а с другой стороны, не соглашался с теоретической интерпретацией этих экспериментов. Именно Гюйгенс первым сформулировал волновую теорию света в своём «Трактате о свете», который вышел в 1690 г.

ФРОНТ ВОЛНЫ

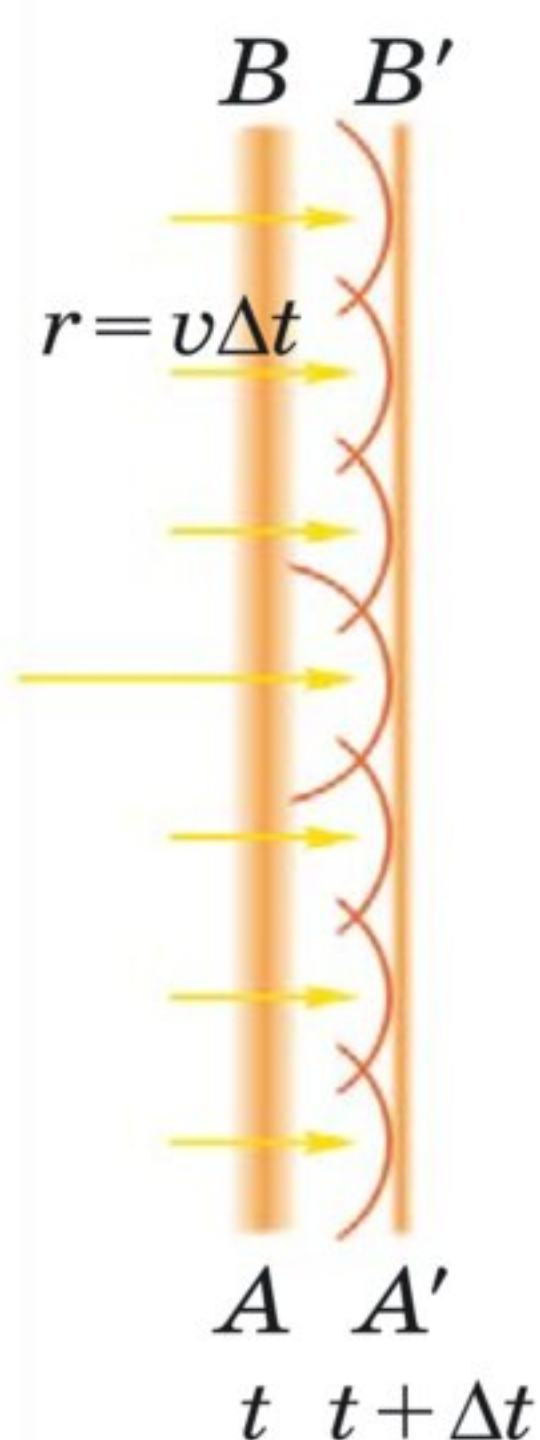
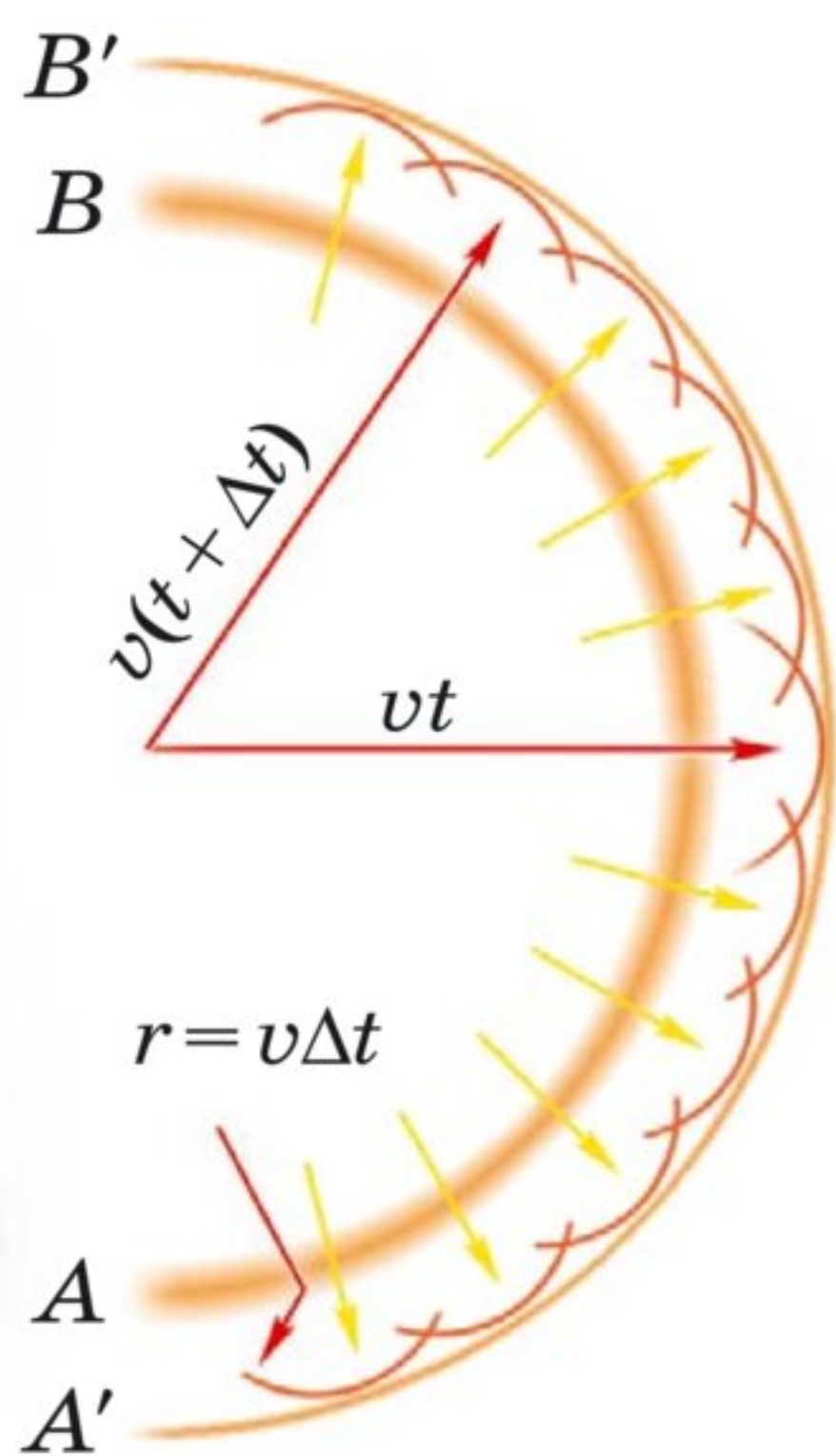
Представим себе источник волнового возмущения, от которого в момент времени t_0 начала распространяться волна. В момент времени t волна достигнет некоторых точек в пространстве, которые называют волновым фронтом. Если волна распространяется по поверхности воды, то **волновой фронт** — это линия. Если же говорить о звуковой или световой волне, то волновой фронт — это поверхность. Итак, волновым фронтом называют совокупность всех точек пространства, которых волновое возмущение достигает в один и тот же момент времени. Если волновой фронт представляет собой сферу (окружность), то волну называют *сферической*. Если же волновой фронт представляет собой плоскость (прямую), то волну называют *плоской*. Направление распространения волны принято изображать лучом, перпендикулярным к волновому фронту.



ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА гласит, что **каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн**. При этом вторичные волны от точек волнового фронта распространяются в первоначальном направлении со скоростью волны. Новый волновой фронт можно найти, если построить поверхность, касательную к волновым фронтам вторичных волн.

Принцип Гюйгенса справедлив для волн любой природы: механических, включая звуковые, и электромагнитных, включая световые.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ Принцип Гюйгенса позволяет объяснить закон отражения световых волн от границы раздела двух сред. Рассмотрим, как происходит отражение плоской волны от плоской границы раздела двух сред. Пусть AB — фронт падающей волны в момент времени, когда волна достигла отражающей



поверхности в точке A . Как вы уже знаете, угол α между лучом 1 и нормалью к границе раздела — это угол падения. По принципу Гюйгенса точка A сама становится источником вторичных волн. В момент времени, когда падающая волна достигнет отражающей поверхности в точке P (луч 2), фронт вторичной волны из точки A уже будет представлять собой полусферу. Радиус этой полусферы: $r = v\Delta t$, где v — скорость распространения волны, а Δt — промежуток времени между приходом волны в точку A и приходом волны в точку P . Аналогично, когда волна достигнет точки A' отражающей поверхности, фронты вторичных волн из точек A и P будут представлять собой полусферы различных радиусов. Если теперь построить касательную поверхность к волновым фронтам вторичных волн, мы получим фронт отражённой волны. Лучи $1'$, $2'$ и $3'$ показывают направление распространения вторичных волн и, следовательно, направление распространения отражённой волны. Угол β между нормалью к отражающей поверхности и отражённым лучом — это угол отражения. При помощи несложных геометрических преобразований, учитывающих постоянство скорости распространения волны в среде, можно доказать, что углы α и β равны, т.е. угол падения равен углу отражения.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ Пусть плоская световая волна падает на границу двух сред, например воздуха и воды. Обозначим скорости распространения света в воздухе и в воде соответственно v_1 и v_2 . Вы уже знаете, что $v_2 < v_1$. Поэтому за время t , за которое точка B на волновом фронте AB сместится на расстояние v_1t и достигнет точки D , вторичная волна из точки A пройдёт расстояние v_2t и достигнет точки C .

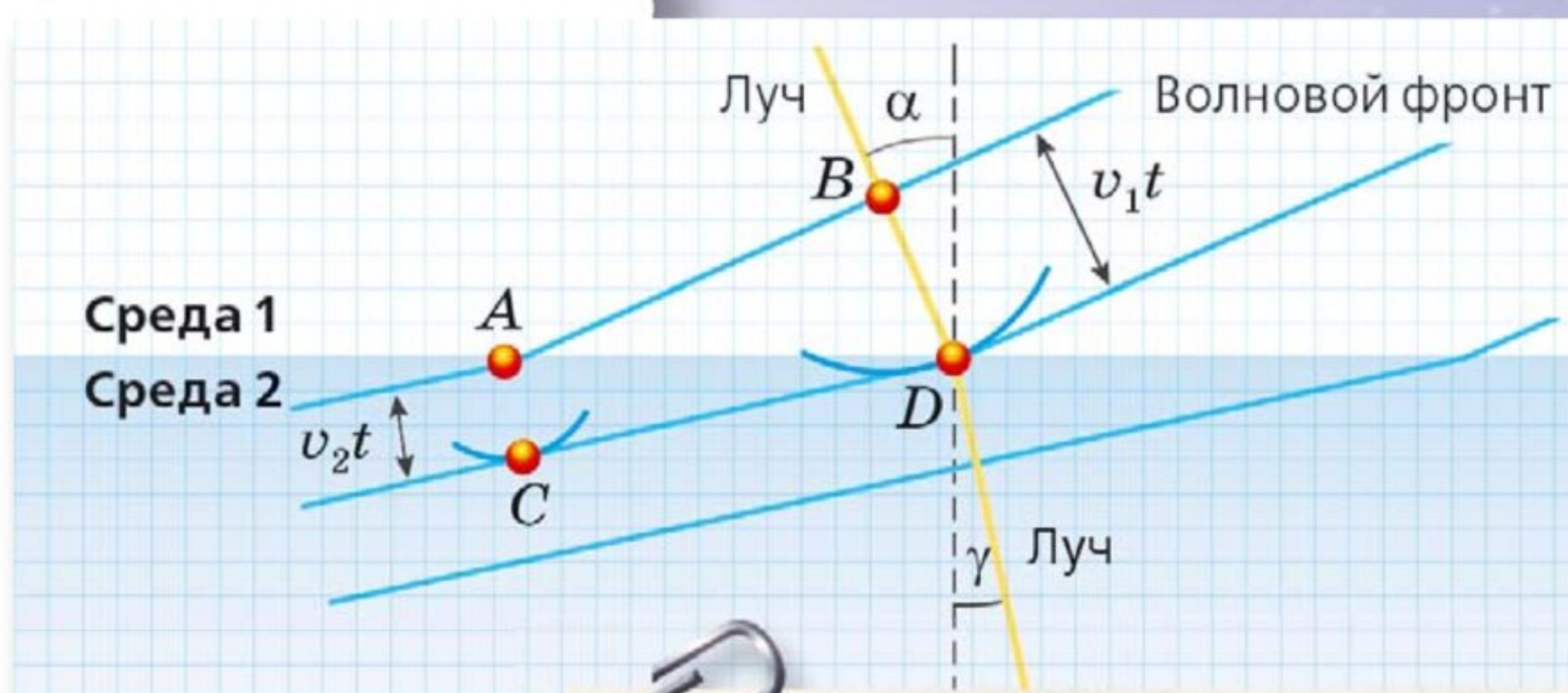
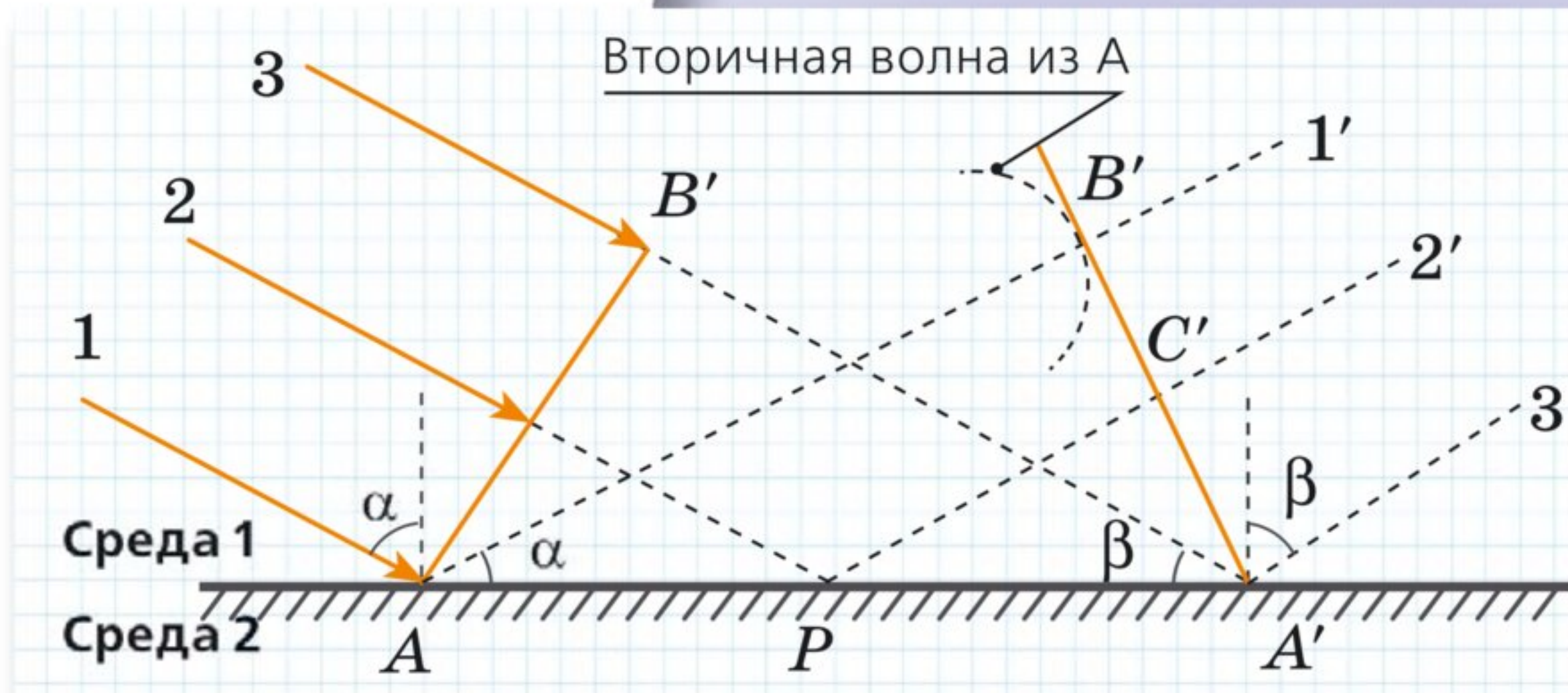
По принципу Гюйгенса волновой фронт, образованный касательной к фронтам вторичных волн, проходит по линии CD . Так как $v_2t < v_1t$, волна отклоняется в направлении нормали и угол преломления γ меньше угла падения α .

Можно показать, что закон преломления следует из принципа Гюйгенса, поскольку скорость света v в любой среде связана со скоростью света c в вакууме и показателем преломления n соотношением $v = c/n$. Лучи падающий, преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

Если, кроме того, свет употребляет для своего прохождения некоторое время, — что мы сейчас проверим, — то из этого следует, что это движение, сообщённое окружающей материи, следует одно за другим во времени; поэтому оно, подобно звуку, распространяется сферическими поверхностями и волнами; я называю их волнами по тому сходству, которое они имеют с волнами, образующимися на воде, когда в неё брошен камень...

Х. Гюйгенс



Законы геометрической оптики являются следствиями волновой теории света в случае, когда длина световой волны намного меньше размеров препятствий.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое волновой фронт?
- Сформулируйте принцип Гюйгенса.
- Как при помощи принципа Гюйгенса объясняются законы отражения и преломления света?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Опыт Юнга.
- Что такое интерференция света.
- Что такое когерентные волны.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое явление интерференции волн?



Томас Юнг
(1773—1829)

Английский физик, врач, астроном и востоковед, один из создателей волновой теории света.

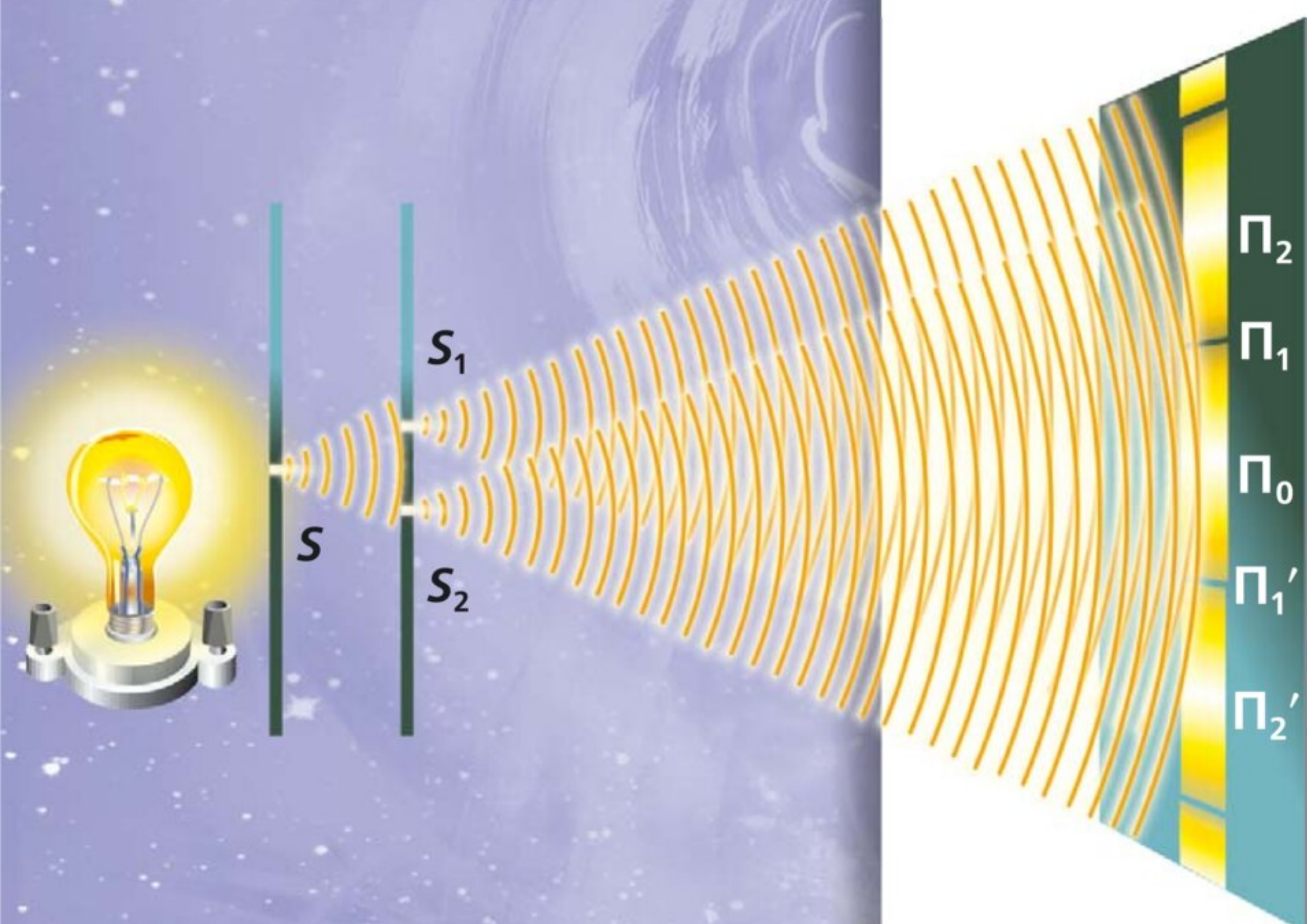
Одной из характерных особенностей всех волновых процессов является интерференция, поэтому обнаружение интерференции света могло бы рассматриваться в качестве главного аргумента в поддержку волновой теории света. Однако все попытки обнаружить интерференцию света от двух независимых источников не увенчались успехом. Включение дополнительного источника приводило лишь к увеличению освещённости, но никакой интерференционной картины не возникало.

ОПЫТ ЮНГА Английский физик Т. Юнг, человек с необычайно широким кругом научных интересов, в 1802 г. осуществил удивительно простой и изящный опыт по интерференции света. За непрозрачной ширмой с узкой щелью Юнг поместил достаточно интенсивный источник, свет от которого через щель падал на другую ширму, снабжённую двумя узкими щелями, расположенными на расстоянии 1–2 мм друг от друга. В результате этого световой пучок, исходящий из щели S , посредством щелей S_1 и S_2 разделялся на два пучка.

В соответствии с корпускулярной теорией Ньютона на экране, установленном за ширмами, должны были появиться две полосы. Однако вместо этого на экране появился ряд светлых полос, разделённых тёмными промежутками. Самым удивительным было то, что прямо против промежутка между щелями S_1 и S_2 на экране образовалась центральная светлая полоса, симметрично которой расположились другие полосы. Это свидетельствовало о том, что свет огибает препятствия так, как предсказывала волновая теория Гюйгенса. Чередование на экране максимумов и минимумов освещённости объяснялось тем, что свет представляет собой волну. Светлые полосы Π_0 , Π_2 и т. д. образуются волнами, исходящими из щелей S_1 и S_2 , которые взаимно усиливают друг друга. Тёмные полосы Π_1 и др. создаются волнами,

которые взаимно гасят друг друга. Таким образом, при разделении светового пучка на два пучка получаются взаимно усиливающие (или ослабляющие) друг друга световые волны, которые интерферируют.

Как уже отмечалось выше, явление интерференции присуще только волновым процессам и характерно для всех видов волн. Поэтому опыт Юнга сыграл определяющую роль в обосновании наличия у света волновых свойств. Измерив положение интерференционных полос, Юнг сумел впервые определить длину волны видимого света, что позволило ему показать, что физические цвета различаются длиной волны.



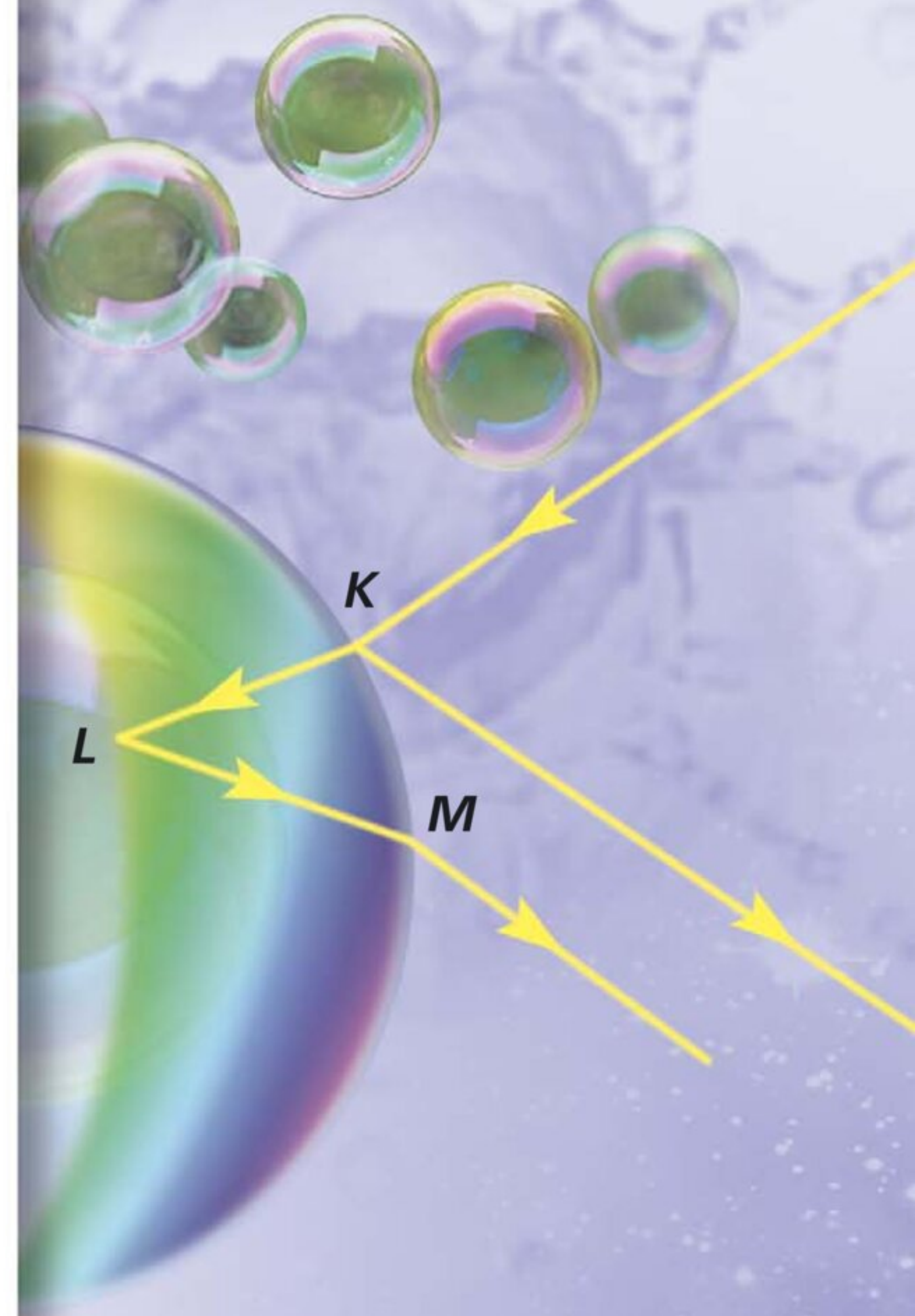
КОГЕРЕНТНОСТЬ Две щели S_1 и S_2 в опыте Юнга действуют подобно двум источникам излучения. Для получения устойчивой интерференционной картины волны должны быть **когерентными**, т. е. иметь одинаковые длины волн и неизменную разность фаз в любой точке пространства. При наложении таких волн они взаимно усиливают друг друга в одних точках пространства и взаимно гасят друг друга в других точках.

Если заменить щели двумя одинаковыми лампочками, то интерференционной картины наблюдаться не будет. Это объясняется тем, что волны от различных источников света некогерентны — они имеют случайный фазовый сдвиг относительно друг друга. В опыте Юнга сферическая волна от источника щели S в соответствии с принципом Гюйгенса возбуждает в отверстиях S_1 и S_2 когерентные колебания. Именно поэтому и возникает интерференционная картина.

ЦВЕТА ТОНКИХ ПЛЁНОК Вероятно, вам приходилось наблюдать радужные переливы цветов тонкой плёнки нефтепродуктов на поверхности луж и игру красок мыльных пузырей, выдуваемых через тонкую трубочку.

Рассмотрим достаточно простой опыт. На проволочную рамку, которую предварительно окунули в мыльный раствор, направляется свет от какого-либо источника. Опыт лучше всего проводить в затемнённой комнате, а в качестве источника света использовать спиртовку, в пламя которой вносится кусочек асбестовой ткани, смоченной раствором поваренной соли. При этом на поверхности мыльной плёнки, расположенной вертикально, будут наблюдаться чередующиеся жёлтые и чёрные полосы. Если смотреть сбоку, то сильно увеличенное сечение плёнки напоминает клин, так как мыльный раствор стекает вниз. Световая волна, падающая в точку K поверхности, частично отражается и частично проникает внутрь плёнки, отражаясь при этом в точке L , находящейся на задней поверхности. В результате получаются две волны, излучаемые из точек K и M , которые будут интерферировать, поскольку они порождены одной и той же волной. Разные участки плёнки имеют различную толщину, поэтому если на разности хода KLM укладывается целое число волн, то волны будут усиливать друг друга, и в этом месте плёнки будет наблюдаться жёлтая линия. Если же на пути KLM укладывается нечётное число полуволн, то будет тёмная полоса.

КОЛЬЦА НЬЮТОНА Примером интерференции являются так называемые кольца Ньютона, для наблюдения которых монохроматический свет направлялся на плоско-выпуклую линзу, установленную на тщательно отполированную пластинку. В отражённом свете наблюдалась интерференционная картина в виде концентрических колец. Кольца Ньютона возникают из-за интерференции света, отражённого от верхней и нижней границы воздушной прослойки между стёклами.



Несмотря на название, первым кольца Ньютона обнаружил Роберт Бойль, а через два года они были независимо обнаружены Робертом Гуком. Сам Ньютон придерживался корпускулярной теории света, поэтому объяснить это явление не смог. Объяснить этот опыт удалось Томасу Юнгу благодаря использованию волновой теории света.

ВОПРОСЫ:

- Почему два независимых источника не могут создать устойчивую интерференционную картину?
- Какой главный вывод сделал Юнг на основе своего опыта?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Опыты Гримальди и Юнга по дифракции света.
- В чём заключается принцип Гюйгенса—Френеля.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое дифракция волн?

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Рассмотренные ранее опыты по интерференции света убедительно свидетельствуют о его волновых свойствах. Поэтому для света должна также наблюдаться и дифракция, которая присуща любому волновому процессу. Но в отличие от дифракции механических волн, наблюдать дифракцию света намного сложнее. Дело в том, что световые волны дифрагируют заметным образом только в том случае, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны, а она у света очень мала.

ОПЫТЫ ГРИМАЛЬДИ Первые опыты по дифракции света выполнил в XVII в. итальянский учёный Ф. Гримальди. В частности, пропуская узкий пучок света через малое отверстие, Гримальди обнаружил отступление от закона прямолинейного распространения света: размер светлого пятна на экране, расположенном против отверстия, оказался больше размера самого отверстия.

Опыты также показали, что если диаметр отверстия (размер щели) в ширме достаточно велик, а расстояние от ширмы до экрана не очень велико, то закон прямолинейного распространения света выполняется с высокой точностью. Поскольку Гримальди разделял точку зрения Гюйгенса на природу света, то наблюдаемые особенности в распространении света он объяснял тем, что свет — это волна.

ОПЫТ ЮНГА Классический опыт по дифракции света был осуществлён в 1802 г. Т. Юнгом, открывшим явление интерференции света. Световой пучок, исходящий из узкой щели первой ширмы, освещал две близко расположенные щели во второй ширме. Так как из щели S выходил узкий пучок света, он разделялся в щелях S_1 и S_2 на источники когерентных волн (рис. на с. 108). Вследствие дифракции из этих щелей выходили два расходящихся световых пучка, которые частично перекрывались, при этом на экране, установленном за ширмой, наблюдалась интерференционная картина.

Таким образом, на основе опыта Т. Юнг продемонстрировал два важнейших свойства света — интерференцию и дифракцию световых волн. Кроме того, опираясь на результаты своего опыта, Юнг впервые получил достаточно

Франческо Мария Гримальди
(1618—1663)

Итальянский физик и астроном. Дал описание открытого им явления дифракции света.

точную оценку длины световой волны. Последовательную теорию дифракции света развил в своих работах современник Юнга французский учёный О. Френель.

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА—ФРЕНЕЛЯ В 1819 г. Френель представил Парижской академии наук свою волновую теорию света, объясняющую явления интерференции и дифракции и позволяющую сделать количественные расчёты проводимых экспериментов. В своей теории Френель объединил принцип Гюйгенса и представления об интерференции вторичных волн.

Согласно принципу Гюйгенса—Френеля **каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причём все вторичные волны когерентны**. Этот принцип позволяет рассчитать амплитуду световой волны в произвольной точке пространства.

Для сторонников волновой теории света в течение долгого времени составляло проблему объяснение закона прямолинейного распространения света. Действительно, если свет — волна, то при наличии препятствий на её пути волна должна отклоняться от прямолинейного распространения.

На самом деле существенным для прямолинейного распространения света является малость длины волны света по сравнению с размерами препятствий. Если же размеры препятствий становятся сопоставимыми с длиной волны, то наблюдается явление дифракции.

Строгий расчёт дифракционной картины является сложной математической задачей, но для ряда практических случаев использование принципа Гюйгенса—Френеля позволяет полностью описать наблюдаемые явления.

ДИФРАКЦИЯ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Дифракция накладывает определённые ограничения на разрешающую способность микроскопов и телескопов. Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики, но, используя только эти законы, невозможно объяснить существование предела разрешающей способности, например, микроскопа. Действительно, законы геометрической оптики не накладывают каких-либо ограничений на увеличение микроскопа или телескопа, которое зависит от фокусных расстояний объектива и окуляра этих приборов.

Однако если при помощи микроскопа пытаться рассмотреть два близкорасположенных объекта очень малых размеров, то вследствие того, что свет огибает препятствия, картина получится размытой. Невозможно различить детали объекта, размеры которого меньше длины волны используемого света.

Таким образом, дифракция существенно ограничивает разрешающую способность микроскопов и телескопов, определяя тем самым границы применимости геометрической оптики.

Когда Френель представил свою теорию, Симон Пуассон указал на одно следствие, противоречащее интуитивным представлениям о свете. Получалось, что если свет от точечного источника падает на непрозрачный диск, то в результате дифракции на краях диска в центре тени от диска должно возникать светлое пятно как результат интерференции. Предложенный Пуассоном эксперимент был осуществлён Франсуа Араго. Каково же было удивление, когда в самом центре тени он обнаружил светлое пятно!

ВОПРОСЫ:

- Какое явление называют дифракцией?
- При каком соотношении между длиной волны и размерами препятствия будет наблюдаться дифракция?
- Почему дифракцию света наблюдать труднее, чем дифракцию механических волн?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое «просветлённая» оптика.
- Принцип действия дифракционной решётки.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое интерференция света?
- Что такое дифракция света?
- В чём заключается опыт Юнга?



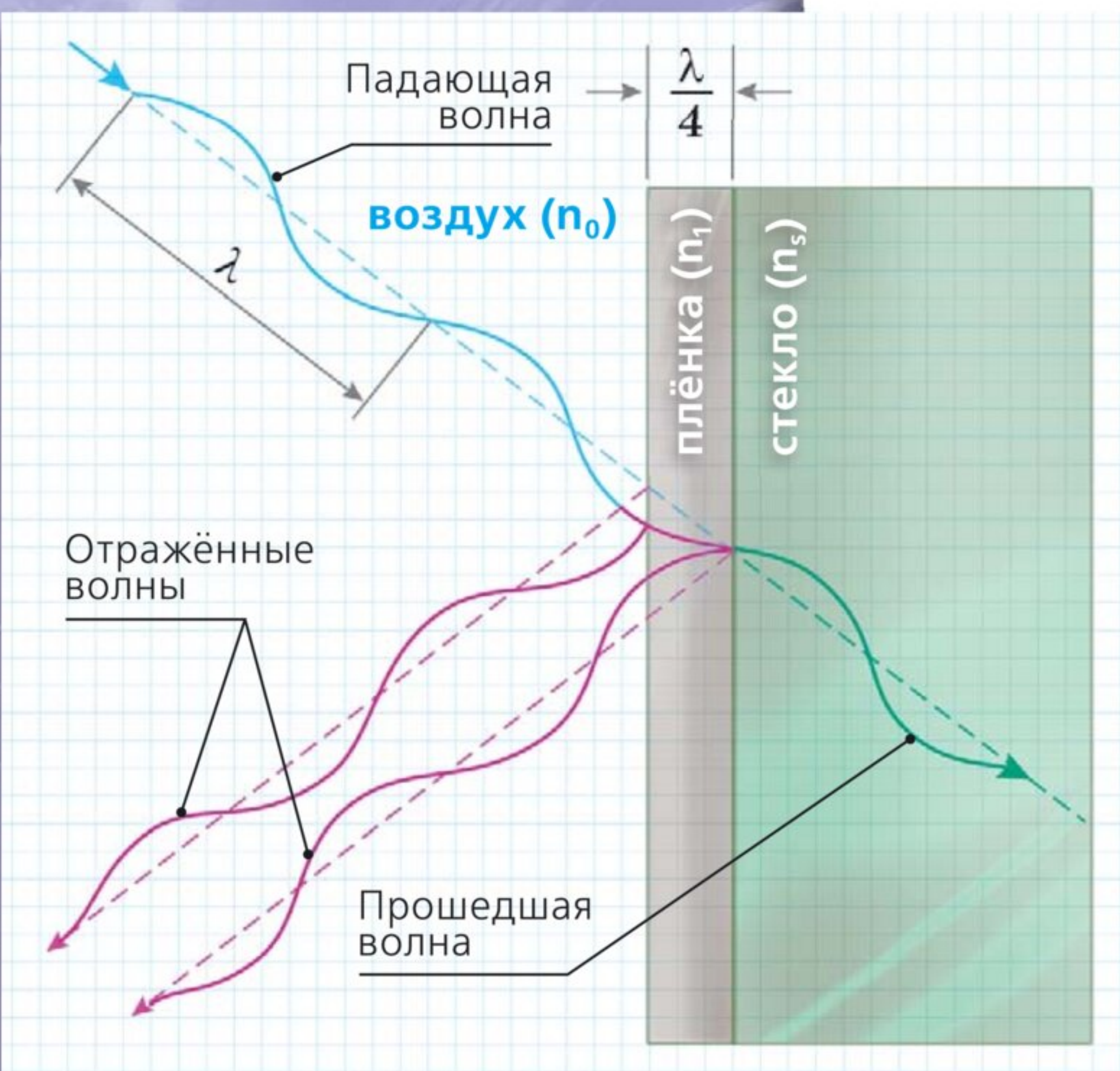
ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Явления интерференции и дифракции света используются в различных оптических приборах.

«ПРОСВЕТЛЁННАЯ» ОПТИКА Одним из важных примеров использования интерференции в тонких плёнках является создание неотражающей, или «просветлённой», оптики. Дело в том, что стекло отражает примерно 4% падающего на него света. Современные высококачественные оптические приборы — фото- и видеокамеры, микроскопы, перископы на подводных лодках — содержат большое количество линз. Отражение света от всех поверхностей линз может существенно уменьшить его интенсивность. Многократные отражения приводят к слабой освещённости изображения и возникновению «вуали», ухудшающей качество изображения.

Нанесение на поверхность линз очень тонкого покрытия (тонкой плёнки) позволяет значительно снизить влияние этих факторов. Коэффициент отражения света на границе раздела двух сред зависит от разности показателей преломления этих сред. В результате интерференции света, отражаемого от передних и задних границ просветляющих плёнок, происходит взаимное «гашение» отражённых световых волн и, следовательно, усиление интенсивности проходящего света. Даже однослойное покрытие линзы позволяет уменьшить коэффициент отражения падающего света от 4 до 1%.

Часто покрытие выбирается таким образом, чтобы исключить потери при отражении волн из центральной части спектра (вблизи 550 нм). Волны, соответствующие края спектра — красные и фиолетовые, в этом случае ослабляются меньше. Так как смесь фиолетового и красного цвета даёт пурпурный цвет, линзы с просветляющим покрытием отсвечивают пурпуром. Линзы с двумя и тремя слоями покрытий будут ещё слабее отражать свет в более широком диапазоне длин волн.



ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА На явлении дифракции основано устройство полезного оптического прибора — дифракционной решётки, состоящей из большого числа параллельных щелей, расположенных на равных расстояниях друг от друга. Часто дифракционные решётки делают из стекла, нанося на него очень тонкие линии алмазным резцом. Промежутки между штрихами служат щелями. Дешёвые дифракционные решётки изготавливают, делая фотокопии с решётки-оригинала.

Фотовоспроизведение с уменьшением позволяет сделать решётки с очень малым расстоянием между соседними щелями. В настоящее время широко используются решётки, содержащие до 10 000 штрихов на 1 см. Они применяются при измерениях длин волн с высокой точностью.

Рассмотрим принцип действия дифракционной решётки. Пусть на решётку падают параллельные лучи света. Будем считать щели достаточно узкими, так что после дифракции на каждой щели волны распространяются в широком диапазоне углов и на удалённом экране за решёткой могут интерферировать с волнами от всех других щелей.

Лучи, не испытывающие в щелях отклонения ($\theta = 0$), создают в результате усиливающей интерференции светлое пятно в центре экрана.

Под углом θ , при котором лучи от соседних щелей обладают разностью хода $\Delta l = m\lambda$ (m — целое число), также имеет место усиливающая интерференция.

Обозначим буквой d расстояние между центрами соседних щелей. Это расстояние называют **периодом дифракционной решётки**.

Условие, при котором усиление максимально (максимум интенсивности), можно записать в виде

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

поскольку оптическая разность хода от соседних щелей равна $\Delta l = d \sin \theta$.

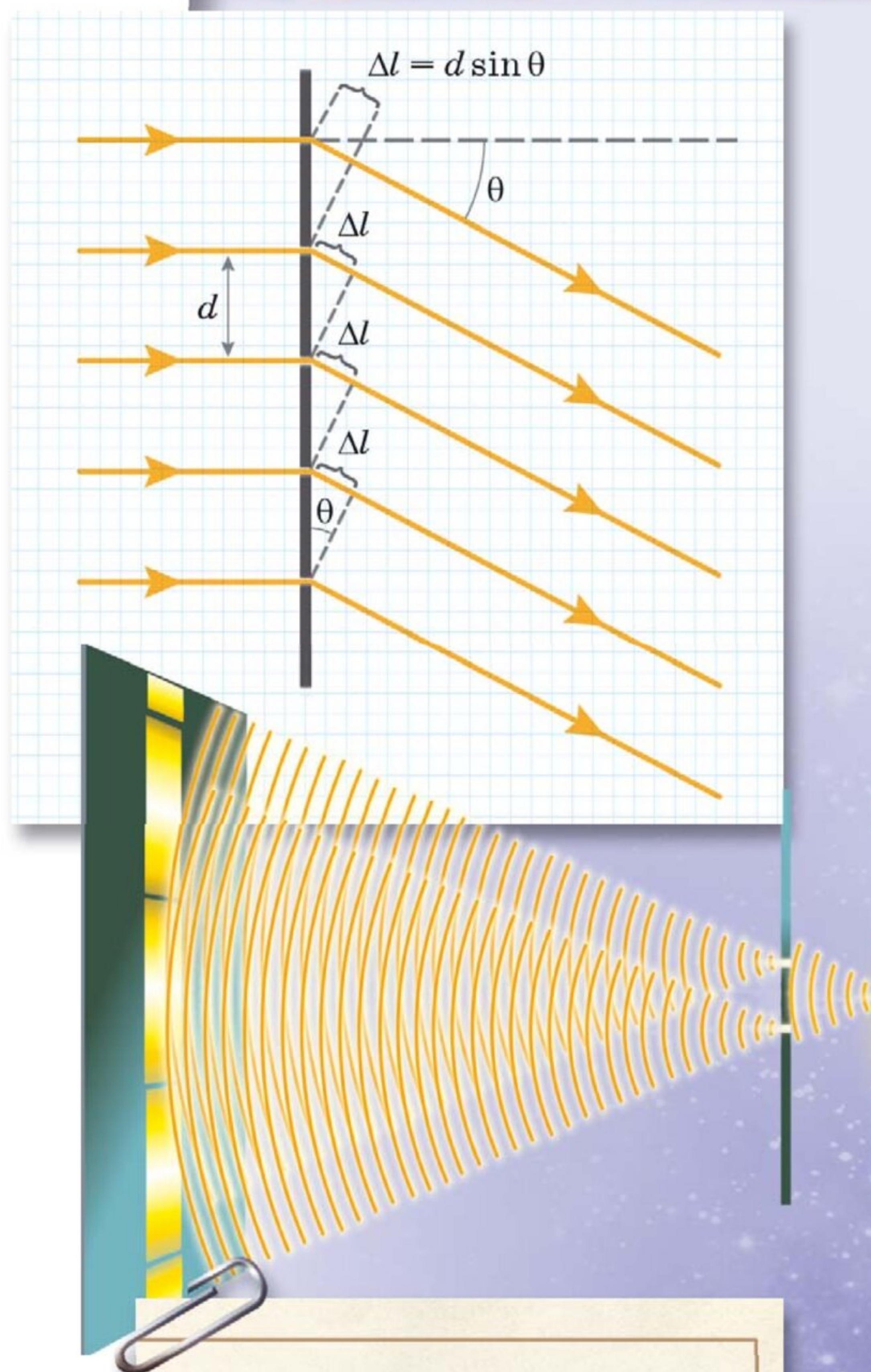
Такое же соотношение справедливо и в случае двух щелей. Однако между дифракционными картинками от двух и от большого числа щелей существует важное различие: у дифракционной решётки максимумы оказываются гораздо более резкими и узкими.

Чем больше штрихов у дифракционной решётки, тем резче и интенсивнее максимумы. Это позволяет использовать дифракционную решётку в качестве прибора для измерения длин волн.

Предположим, что свет, падающий на дифракционную решётку, не монохроматичен, а содержит две или несколько различных частот. Тогда для всех углов, кроме $\theta = 0$, для каждой длины волны максимумы будут возникать под своими углами.

Если на дифракционную решётку падает белый свет, то центральный максимум ($\theta = 0$) будет представлять собой резкую белую полосу, но во всех других порядках максимумы будут представлять собой чередование цветных полос, распределённых в некотором диапазоне углов.

Картина, полученная вследствие разложения света дифракционной решёткой на составляющие с различными длинами волн, называется спектром.



Длина волны рентгеновского излучения примерно на три порядка меньше длины световой волны. Поэтому для наблюдения дифракции рентгеновских лучей искусственные дифракционные решётки непригодны. Для этих целей используются кристаллы, обладающие упорядоченной структурой. По сути, они представляют собой природные дифракционные решётки с периодом порядка 10–8 см.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какое явление лежит в основе действия «просветлённой» оптики?
- Сформулируйте условие максимального усиления световых волн в дифракционной решётке.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- К какому виду волн принадлежат световые волны.
- Что такое поляризация света.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое продольная и поперечная волна?

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Явления интерференции и дифракции объясняются волновой природой света. При изучении механических волн вы узнали, что волны бывают поперечными и продольными, при этом в твёрдых телах, жидкостях и газах могут распространяться продольные волны, а поперечные волны могут распространяться только в твёрдых телах, в которых возникают упругие деформации сдвига. Какой же волной является свет: поперечной или продольной?

ПЛОСКОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ Рассмотрим опыт по прохождению поперечной волны, возбуждаемой на упругом шнуре, через две решётки из параллельных брусьев, расположенных в одном случае вертикально, а в другом — горизонтально. Видно, что волны, образованные на шнуре, свободно пройдут через две решётки в том случае, если колебания частиц шнура будут совершаться в вертикальной плоскости параллельно щелям между брусьями. Но если брусья второй решётки горизонтальны, то они практически полностью погасят вертикальную поперечную волну. Подчеркнём, что подобная задержка волн характерна только для поперечных волн и только в том случае, когда направление колебаний перпендикулярно к щелям препятствия.

Плоскость, в которой происходят колебания (в нашем примере — упругого шнура), называют *плоскостью поляризации*. Опыт показывает, что вертикально поляризованная волна пройдёт через вертикальную щель и погасится при прохождении через горизонтальную щель. Подчеркнём, что поляризация может существовать только у поперечных волн, а не у продольных. В продольных волнах колебания совершаются в направлении их распространения, и никакой ориентацией щели эти волны погасить нельзя.

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН Можно ли осуществить аналогичную проверку на поперечность для световых волн? Такая возможность есть, поскольку имеются устройства, называемые *поляризационными фильтрами*, принцип действия которых отдалённо напоминает действие решётки. Устройство фильтра таково, что он способен пропускать световые волны лишь в том случае, если направление колебаний совпадает с некоторым направлением в плоскости фильтра. Назовём это направление оптической осью фильтра. Если солнечный луч направить перпендикулярно плоскости фильтра, то на первый взгляд не произойдёт ничего существенного: свет проходит при любой ориентации оси фильтра, лишь его яркость несколько уменьшается. На самом деле это не так: в волне, прошедшей через фильтр, колебания будут

осуществляться только в направлении, параллельном оптической оси фильтра.

Поместим теперь за первым фильтром второй так, чтобы их оси были параллельны. Как показывает опыт, в этом случае свет проходит свободно через оба фильтра. При этом наблюдается полная аналогия с прохождением поперечной волны на шнуре через решётки с параллельными брусьями.

Если же изменить ориентацию осей фильтров, сделав их взаимно перпендикулярными, то второй фильтр полностью задерживает прохождение света. Это означает, что световая волна является поперечной. Естественным примером поляризационного фильтра может служить кристалл турмалина — минерала зелёного цвета.

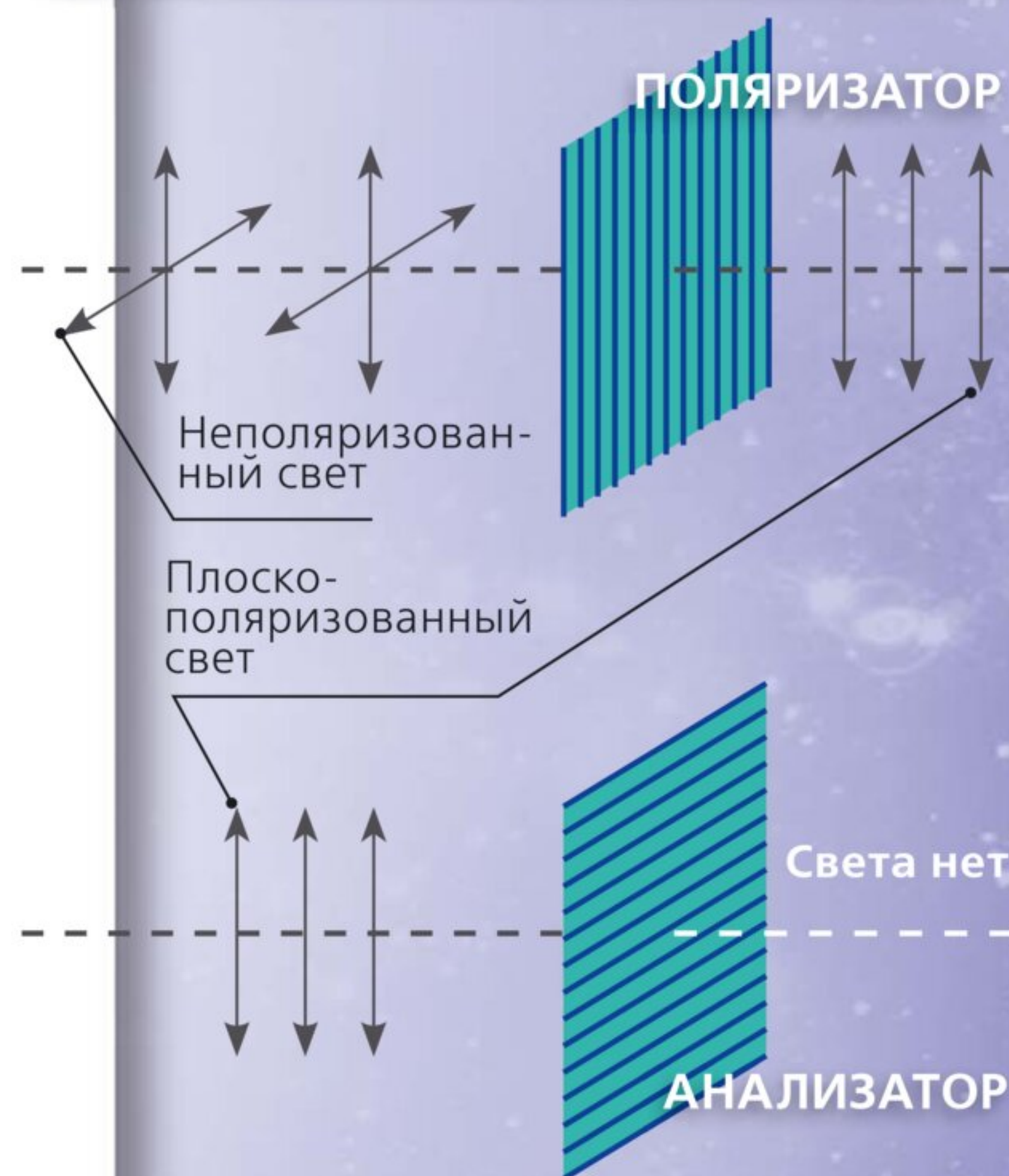
ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА Свет может быть как поляризованным, так и неполяризованным. Если колебания происходят одновременно во многих плоскостях, то такой свет называют *естественным светом*. Примером источника неполяризованного света является обычная лампа накаливания.

Поляризовать неполяризованный свет можно, например, при помощи поляроидной плёнки. Поляроид действует как набор параллельных щелей, почти без потерь пропуская свет одной поляризации (соответствующее направление называется осью поляроида) и почти полностью поглощая свет, поляризованный в перпендикулярной плоскости.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА Вместе с тем оставался один вопрос, который на протяжении почти трёх столетий волновал умы учёных: если свет — волна, то для его распространения необходима среда. Более того, если свет — поперечная волна, то среда должна быть твёрдой. Эта необычная и невидимая упругая среда, которая должна заполнять всё мировое пространство, получила название светового эфира.

Взгляды на природу света начали радикально меняться начиная со второй половины XIX в., после создания Дж. Максвеллом теории электромагнетизма. Максвелл теоретически доказал возможность существования электромагнитных волн, способных распространяться в пустоте (в вакууме), и определил их скорость. Из теории Максвелла также следовало, что электромагнитные волны являются поперечными. Экспериментальное открытие Г. Герцем электромагнитных волн подтвердило основные положения электромагнитной теории Максвелла. Измеренная Герцем скорость электромагнитных волн оказалась равной скорости света, что позволило сделать вывод о том, что свет — это электромагнитная волна. При этом Герц опытным путём доказал, что электромагнитным волнам присущи явления отражения, преломления, интерференции и дифракции.

Поляроид можно использовать в качестве поляризатора для получения плоскополяризованного света из неполяризованного, так как поляроид пропускает только компоненту волны с поляризацией, параллельной его оси. Поляроид можно также использовать в качестве анализатора, когда требуется установить, поляризован ли свет и в какой плоскости он поляризован. Поляроид-анализатор пропускает одно и то же количество света независимо от ориентации своей оси, если свет не поляризован. Но если свет поляризован, то при вращении поляроида интенсивность пропускаемого света максимальна, когда плоскость поляризации параллельна оси поляроида, и минимальна, когда она перпендикулярна оси поляроида.



ВОПРОСЫ:

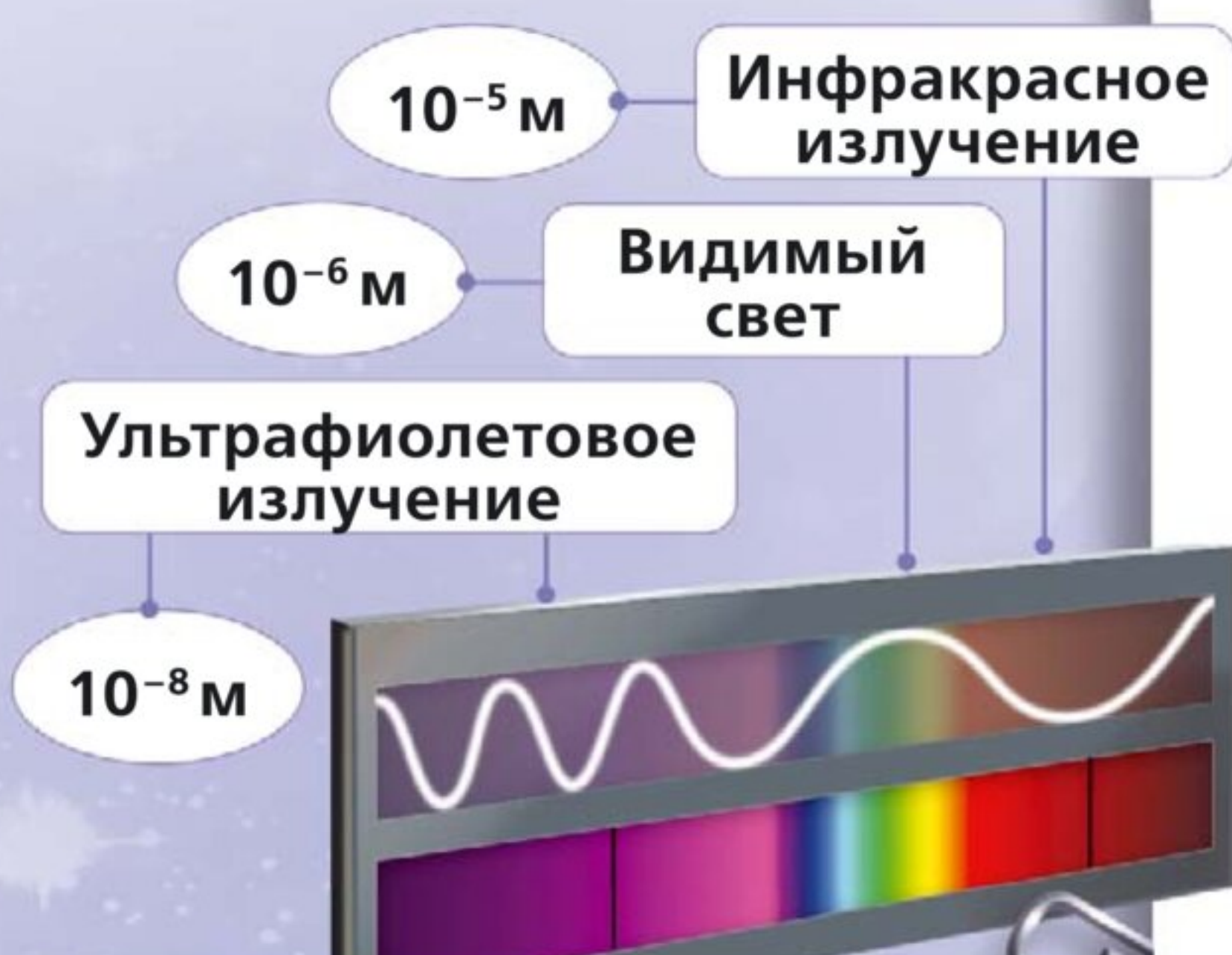
- Какие опыты позволяют утверждать, что световые волны являются поперечными?
- Какие следствия теории Максвелла позволяют утверждать, что свет является электромагнитной волной?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каков диапазон длин волн видимого света.
- Как мы видим цвет.
- Что такое основные и вторичные цвета.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое дисперсия света?
- Что такое отражение, рассеяние, поглощение света?



Одним из способов демонстрации того, что красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый цвета при сложении образуют белый цвет, является использование вращающегося диска Ньютона. Этот диск разделён на секторы, окрашенные в цвета радуги. По мере увеличения скорости вращения диск начинает казаться белым. Или, точнее, серовато-белым, так как краски отражают не вполне чистые цвета.

ЦВЕТ

Опыты Ньютона убедительно свидетельствовали о том, что белый свет имеет сложную структуру. Окружающий нас мир является красочным именно потому, что солнечный свет является сложным. Волновая теория света позволила объяснить такое важное свойство света, как цвет.

ДЛИНА СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ Вы уже знаете, что призма разлагает белый свет на все цвета радуги. Так как показатель преломления среды зависит от скорости света в ней, то волны, соответствующие фиолетовой части спектра, имеют в веществе наименьшую скорость, а волны, соответствующие красной части спектра, — наибольшую. Объясняется это тем, что показатель преломления зависит от длины волны (или её частоты колебаний). Чем меньше длина волны, тем больше показатель преломления. Таким образом, цвет зависит от длины световой волны (или частоты света).

Видимый свет соответствует диапазону длин волн от 400 до 750 нм. Этот диапазон длин волн называется **оптическим**. Свет с длинами волн короче 400 нм называют **ультрафиолетовым (УФ)**, а с длинами волн больше 750 нм — **инфракрасным (ИК)**.

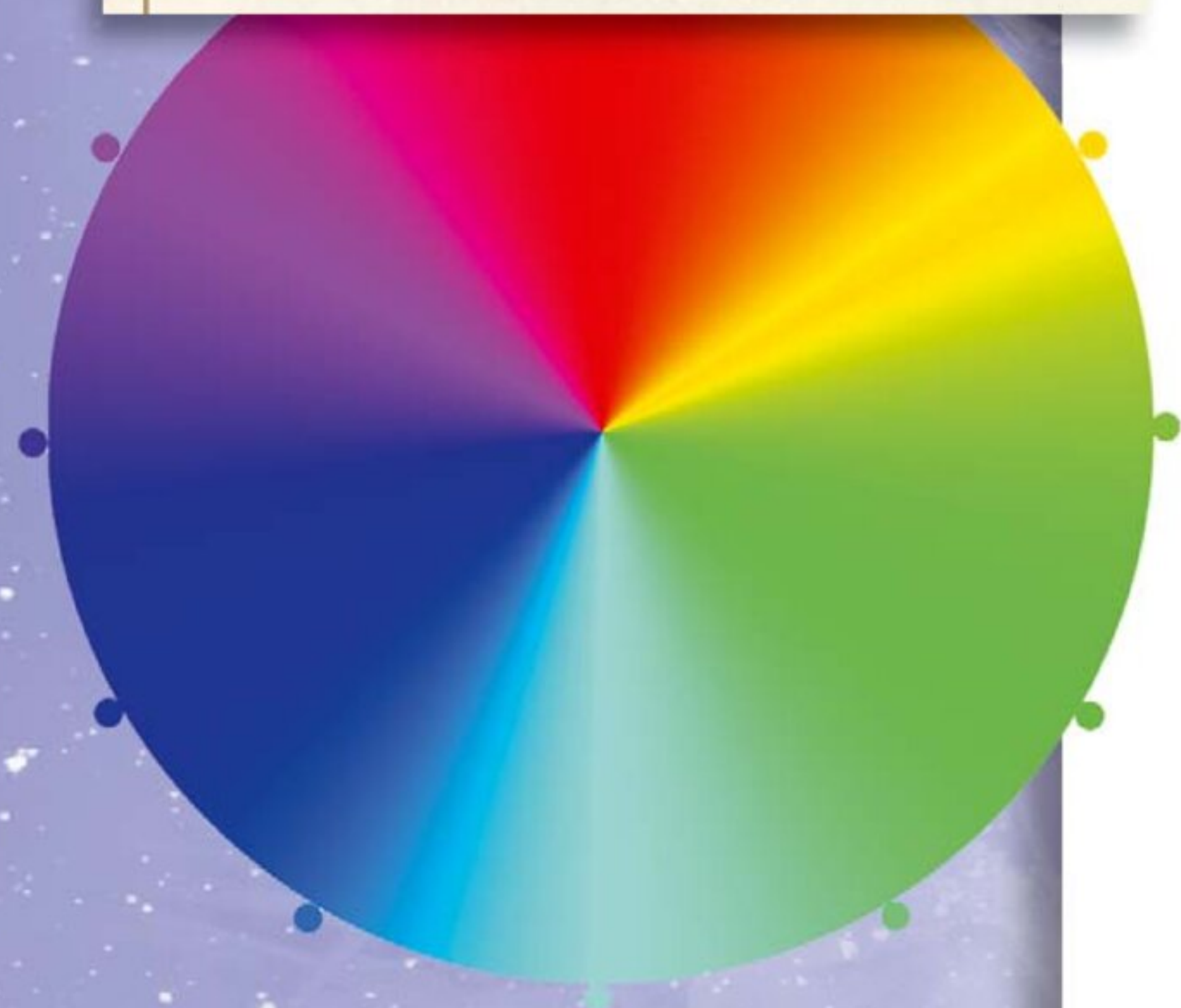
ЦВЕТ ВОКРУГ НАС Почему различные предметы, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разный цвет? Свет, попадая на предмет, частично поглощается, а частично отражается, вот этот отражённый свет и видит наш глаз.

Рассмотрим опыт, в котором синим светом освещаются поочерёдно синие, зелёные, жёлтые и красные листы бумаги. Мы увидим, что только при освещении синей бумаги она будет казаться нам яркой. При освещении же синим светом бумаги других цветов она будет выглядеть тёмной. Это означает, что тела, имеющие синюю окраску, рассеивают в основном синие лучи, а остальные поглощают. Аналогично тела, имеющие красную окраску, в основном рассеивают красные лучи.

Белые тела, которые освещаются дневным светом, в равной степени рассеивают лучи всех цветов, поэтому мы их видим белыми. Чёрные же тела представляются нам чёрными потому, что они поглощают практически все падающие на них лучи.

Итак, цвет предмета определяется количеством поглощённого и рассеянного света, которым этот объект освещается. А способность отражать и поглощать свет определяются физическими свойствами вещества, из которого состоит тело, и зависит от его молекулярной структуры.

Помидор кажется нам красным потому, что он рассеивает волны, лежащие в красной области спектра и поглощает все остальные волны спектра. Наличие хлорофилла



в растениях приводит к тому, что они рассеивают волны из зелёной области спектра и поглощают остальные.

Цвет предмета и цвет источника света связаны между собой следующим образом:

- только если есть источник света, мы видим цвет предмета. Без источника света мы не различаем цветов (в тёмной комнате все предметы кажутся нам тёмными);
- цвет предмета зависит от цвета источника света. Если источник освещения синего цвета, то все освещаемые этим светом предметы будут иметь только синие, чёрные и серые цвета;
- цвет предмета зависит от молекулярной структуры вещества, из которого он состоит.

В процессе восприятия цвета предмета участвует не только сам предмет, но и глаз человека, смотрящего на этот предмет, а также мозг, обрабатывающий информацию, полученную через глаза. В сетчатке человеческого глаза находятся рецепторы: колбочки и палочки. Колбочки отвечают за восприятие цвета, палочки в свою очередь за сумеречное зрение. Например, ночью мы не видим цвета, потому что работают палочки, а днём работают и колбочки, и палочки.

ОСНОВНОЙ И ВТОРИЧНЫЙ ЦВЕТА Для того чтобы увидеть белый цвет, не обязательно смешивать все семь цветов спектра, на которые разлагается белый свет. Достаточно смешать всего три цветных луча: красный, зелёный и синий при определённых интенсивностях (яркостях). При наложении красного и зелёного цвета образуется жёлтый цвет, при наложении синего и зелёного — голубой, а при наложении синего и красного — пурпурный. При наложении всех трёх цветов получается белый цвет.

Красный, синий и зелёный цвета называются *основными*, так как они не могут быть образованы сочетаниями других цветов. Жёлтый, голубой и пурпурный называются *вторичными* цветами, и они могут быть получены сочетаниями пар основных цветов.

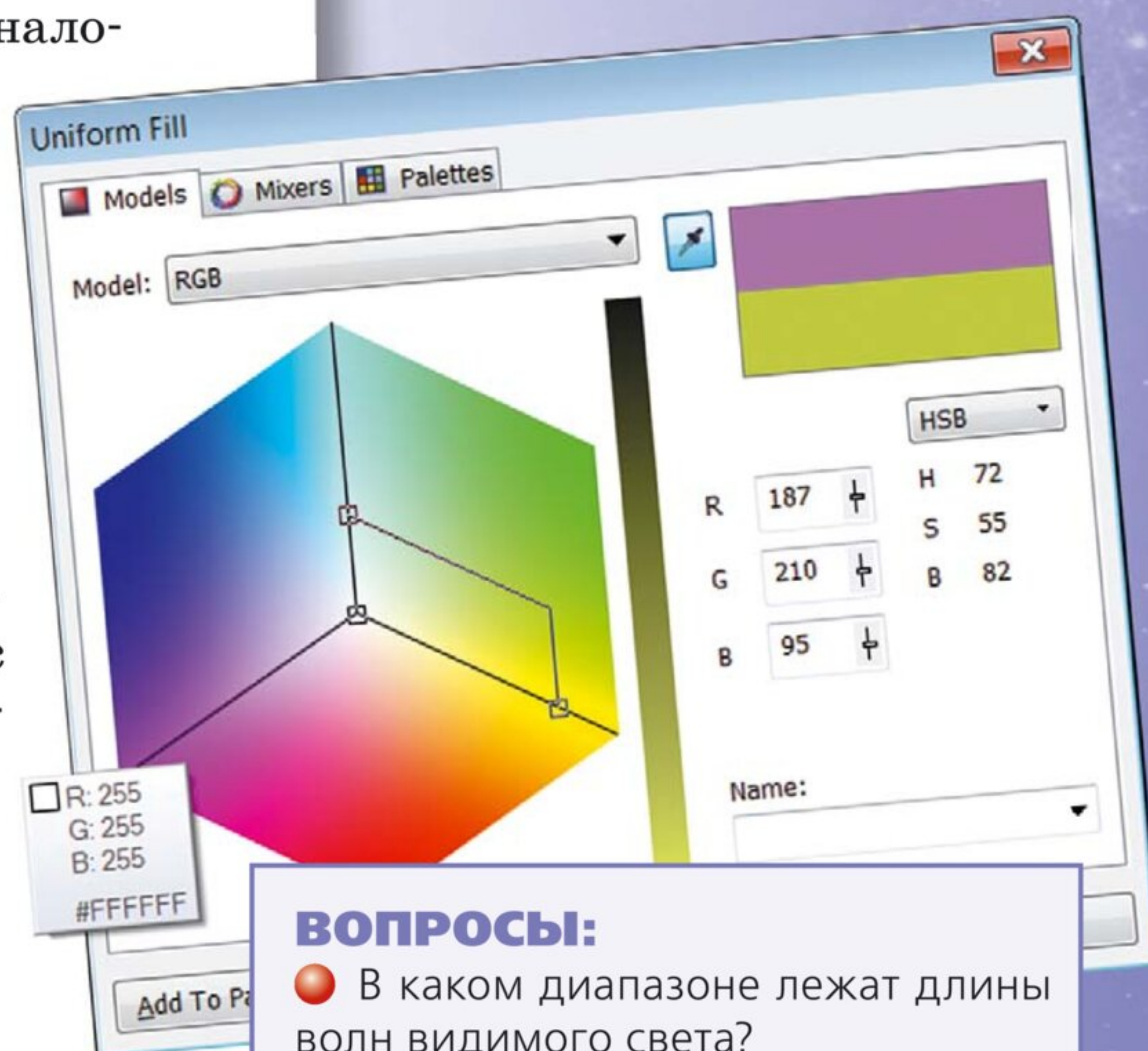
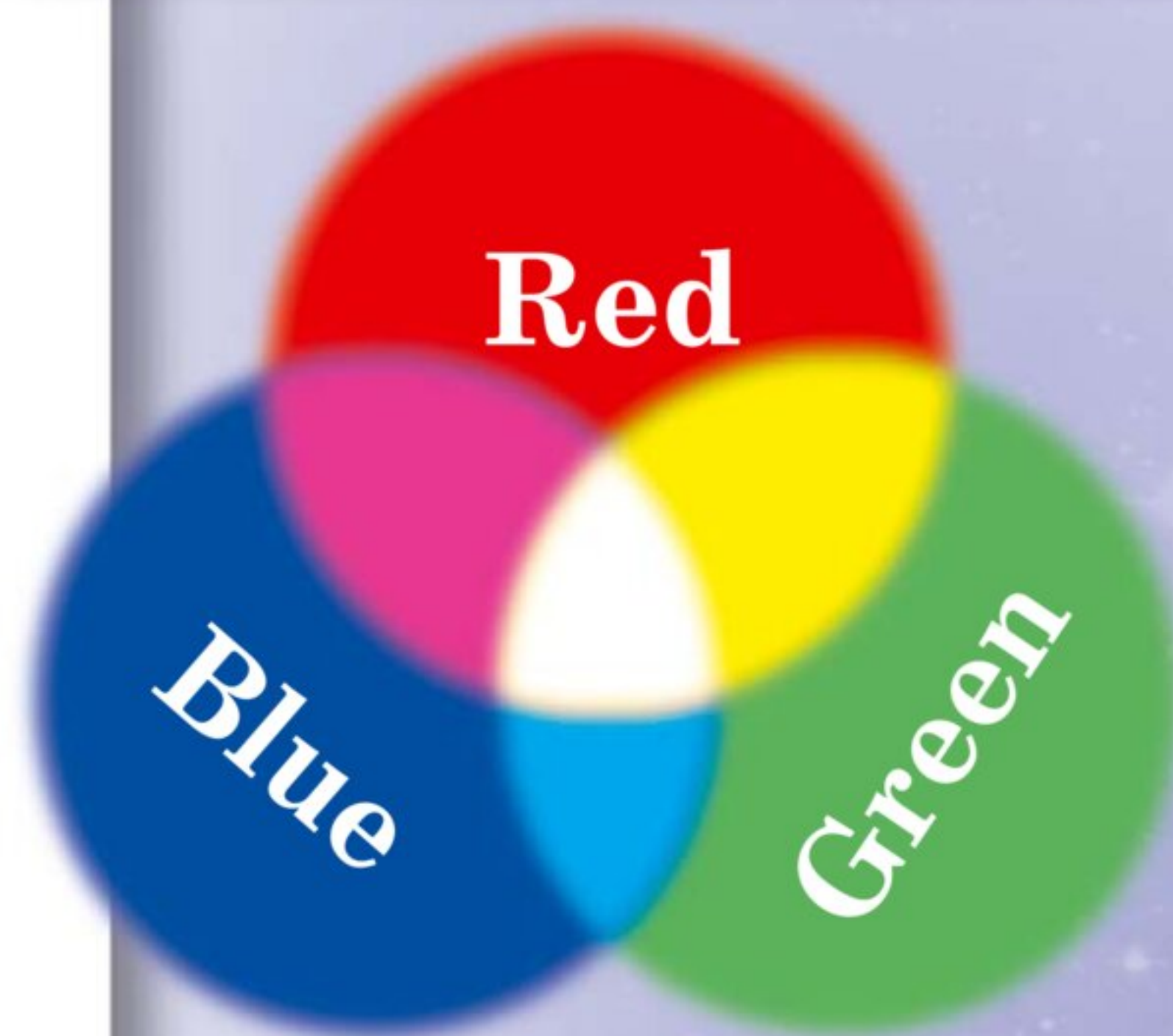
При формировании цвета на компьютере часто пользуются цветовой моделью RGB (Red—Green—Blue), основными цветами которой являются красный, зелёный и синий. В полном соответствии с теорией сумма всех цветов даёт белый цвет, а отсутствие цвета — чёрный. Важной чертой этой модели является численный метод описания цветов. Любой произвольный цвет спектра может быть однозначно описан тремя числами, каждое из которых показывает относительное количество красного, зелёного и синего цветов в этом цвете.

При этом комбинация $R (\text{Red}) = 0$, $G (\text{Green}) = 0$ и $B (\text{Blue}) = 0$ соответствует чёрному цвету, а максимальные значения $R = 255$, $G = 255$ и $B = 255$ описывают белый цвет.

В глазу человека различают три типа колбочек, проявляющих наибольшую чувствительность к трём основным цветам видимого света:

- красно-оранжевому (600 — 700 нм);
- зелёному (500 — 600 нм);
- синему (400 — 500 нм).

Таким образом, для восприятия любого цвета наш мозг смешивает эти три цвета, учитывая ещё один параметр — интенсивность (яркость).



ВОПРОСЫ:

- В каком диапазоне лежат длины волн видимого света?
- Как связаны между собой цвет предмета и источник его освещения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что собой представляют сплошные и линейчатые спектры испускания и поглощения.
- Что такое спектральный анализ.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое дисперсия света?
- Что такое спектр?



Густав Роберт Кирхгоф
(1824—1887)

Знаменитый немецкий физик. Основоположник спектрального анализа.

По предложению Г. Кирхгофа свет пламени пропускался через призму. Если в пламя горелки внести кусочек асбеста, пропитанного раствором поваренной соли, то на бледном фоне сплошного спектра горелки возникнет яркая жёлтая линия, которую дают пары натрия. Хотя для глаза пламя, окрашенное парами лития и стронция, имеет одинаковый цвет, после прохождения излучения через призму свет литиевого пламени даёт две линии — яркую малиновую и слабую оранжевую, а стронций — голубую, две красные и оранжевую линии.

ВИДЫ СПЕКТРОВ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Изучение закономерностей испускания и поглощения электромагнитного излучения сыграло большую роль в становлении теории, описывающей законы микромира. Эти законы оказались во многом непохожими на законы классической физики.

СПЛОШНЫЕ СПЕКТРЫ Опыты Ньютона по пропусканию света через призму показали, что белый свет является сложным: пройдя через призму, он разлагается на пучки различных цветов, которые образуют на экране разноцветную полоску, называемую *спектром*. Аналогичный спектр имеют сильно нагретые тела, например нагретые до белого каления металлы.

Исследования, проведённые при помощи специального чувствительного термометра, показали, что спектр излучения нагретых тел, кроме видимых лучей, содержит ещё и невидимые лучи. Как уже отмечалось ранее, излучение в области длин волн, лежащих за красной областью спектра, называют *инфракрасным*. Инфракрасные лучи испускают все нагретые тела, например горячая печь. Перед фиолетовой областью видимого спектра было экспериментально обнаружено невидимое излучение. Это *ультрафиолетовое* излучение, обладающее сильным физиологическим воздействием.

Поскольку в спектрах нагретых тел нет пустых промежутков, то такие спектры являются непрерывными, или *сплошными*. Такие спектры дают твёрдые тела, жидкости, а также плотные газы.

ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ После изобретения в середине XIX в. Р. Бунзеном специальной газовой горелки в изучении спектров излучения веществ наметился существенный прогресс. Вещества, внесённые в пламя горелки, превращались в пар и окрашивали пламя в различные цвета. Например, медь окрашивала пламя в зелёный цвет, поваренная соль — в жёлтый, а литий — в малиново-красный.



Характерный спектр, также состоящий из набора отдельных цветных линий, даёт свечение газового разряда в трубке, содержащей исследуемый газ. Например, спектр испускания атомарного водорода содержит четыре цветные линии различной яркости, которые разделены ши-

рокими тёмными промежутками. Спектр испускания гелия включает уже семь цветных линий. Таким образом, спектры испускания паров металлов и газов, находящихся в атомарном состоянии, представляют собой набор отдельных цветных линий на чёрном фоне. Такие спектры получили название *линейчатых спектров испускания*.

Как показали тщательные измерения, атомы каждого химического элемента испускают излучение, спектр которого не похож на спектры других элементов. Поэтому для каждого химического элемента составлена специальная таблица, в которой указаны характерные для него линии и их яркость.

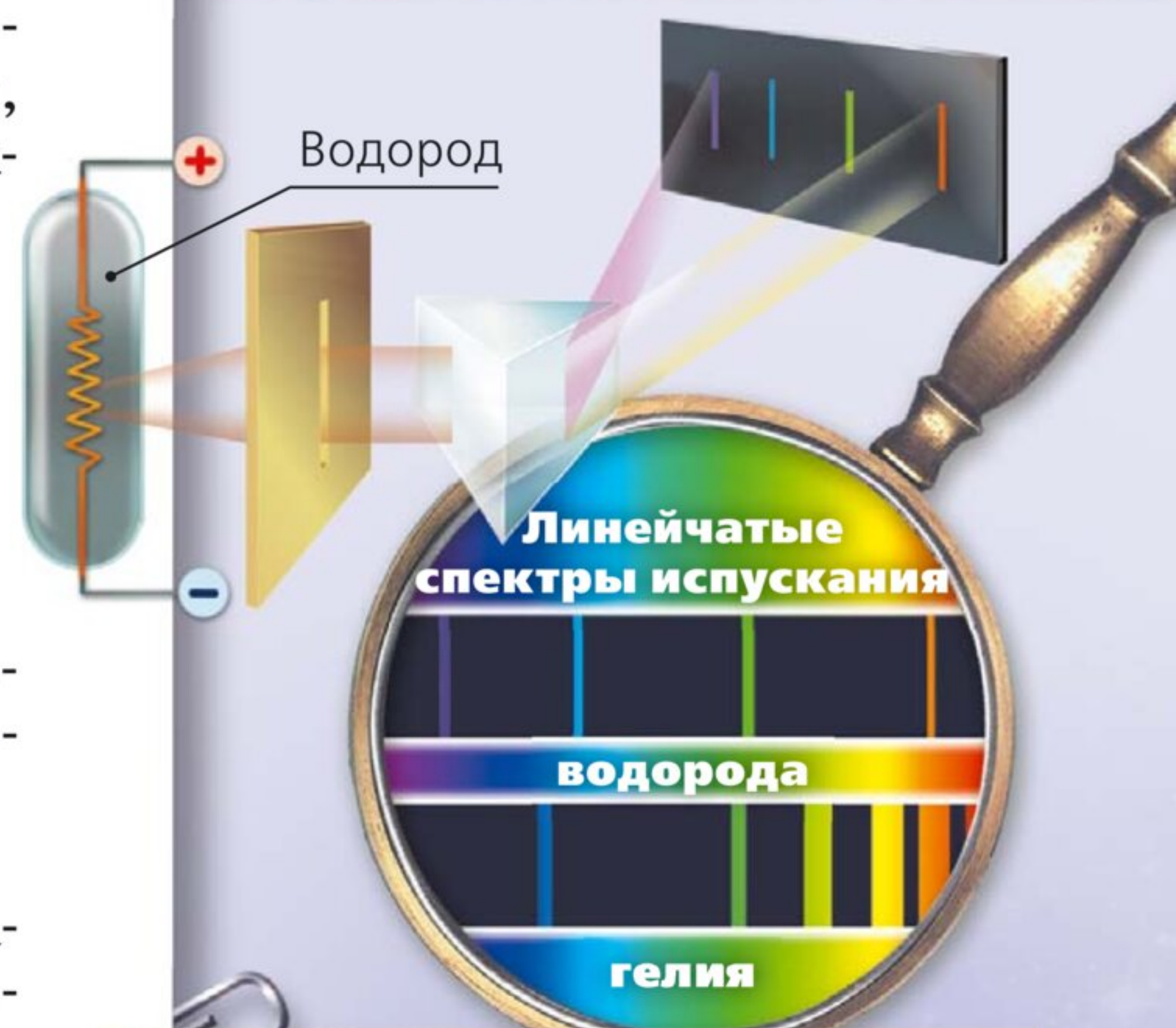
СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ Видоизменим опыт по пропусканию излучения через пары вещества и поместим перед нагретыми парами вещества источник света, дающий непрерывный спектр. При этом на экране, установленном за призмой, будет наблюдаться сплошной спектр, перерезанный тёмными линиями. Эти линии получили название *линий поглощения*, а сам спектр — *линейчатого спектра поглощения*. В 1859 г. Р. Бунзен и Г. Кирхгоф установили, что линии поглощения находятся в тех же участках спектра, где должны быть расположены яркие линии в линейчатом спектре испускания, присущие данному газу, т. е. вещество способно поглощать те волны, которые само испускает в нагретом состоянии. Линейчатые спектры поглощения также имеют строгую индивидуальность.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ Анализ линейчатых спектров излучения и поглощения позволяет расшифровать состав излучающего вещества. Метод определения химического состава вещества по его спектру называют **спектральным анализом**. Метод спектрального анализа был разработан в 1859 г. Р. Бунзеном и Г. Кирхгофом, что ознаменовало появление нового раздела физики — **спектроскопии**, изучающей спектры электромагнитного излучения.

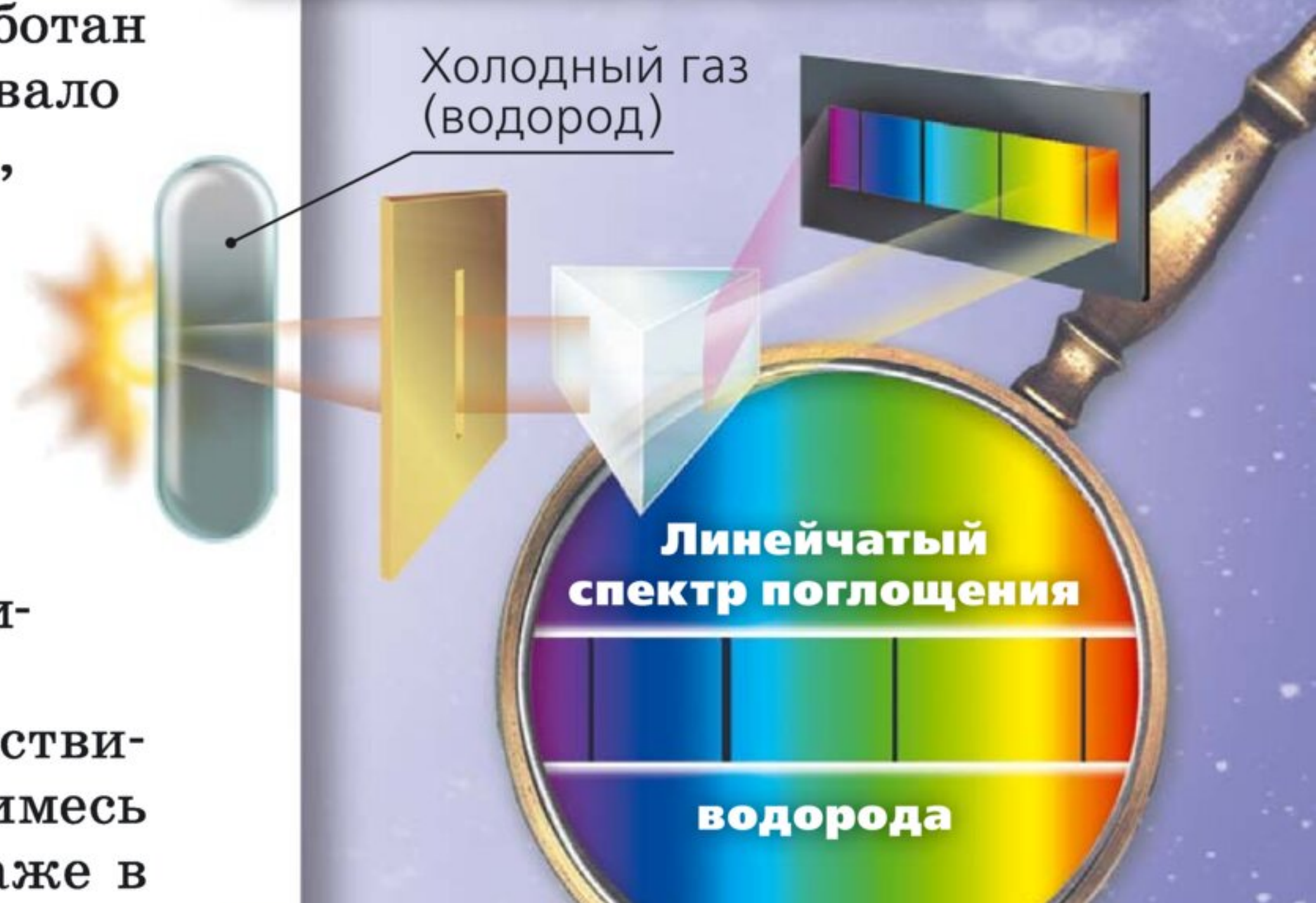
С помощью спектрального анализа излучения Солнца в 1868 г. был открыт неизвестный ранее химический элемент, названный гелием (от греч. *helios* — Солнце). На Земле этот газ открыли только через 27 лет. Изучение линейчатых спектров Солнца и других звёзд показало, что они состоят из тех же химических элементов, которые имеются на Земле.

Спектральный анализ обладает рекордной чувствительностью: с его помощью можно обнаружить примесь нужного элемента в составе сложного вещества даже в том случае, когда его масса не превышает тысячной доли микрограмма.

Например, используемые в лазерной спектроскопии лазеры с перестраиваемой частотой позволяют обнаружить отдельные атомы элемента при концентрации порядка 100 атомов на 1 см^3 объёма газа.



Впервые линейчатый спектр поглощения наблюдал в 1802 г. английский врач и химик Уильям Хайд Волластон. Изучая непрерывный спектр Солнца, он обнаружил в нём несколько резких тёмных линий. Только через 12 лет немецкий физик Й. Фраунгофер, продолжая исследования тёмных линий в спектре Солнца, убедился, что их причина не оптический обман, а сама природа солнечного света. Впоследствии эти линии поглощения назвали фраунгоферовыми линиями солнечного спектра.



ВОПРОСЫ:

- Какие тела излучают сплошные спектры, а какие — линейчатые?
- Что такое спектральный анализ?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое спектр электромагнитных излучений.
- Какие объекты являются источниками электромагнитных излучений во Вселенной.
- Какую роль электромагнитные волны играют в нашей жизни.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электромагнитные волны?
- Что такое длина и частота волны?

СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Во Вселенной существует великое множество различного вида электромагнитных излучений. И звёзды, и планеты, и космическая пыль, а также другие объекты Вселенной являются источниками электромагнитного излучения.

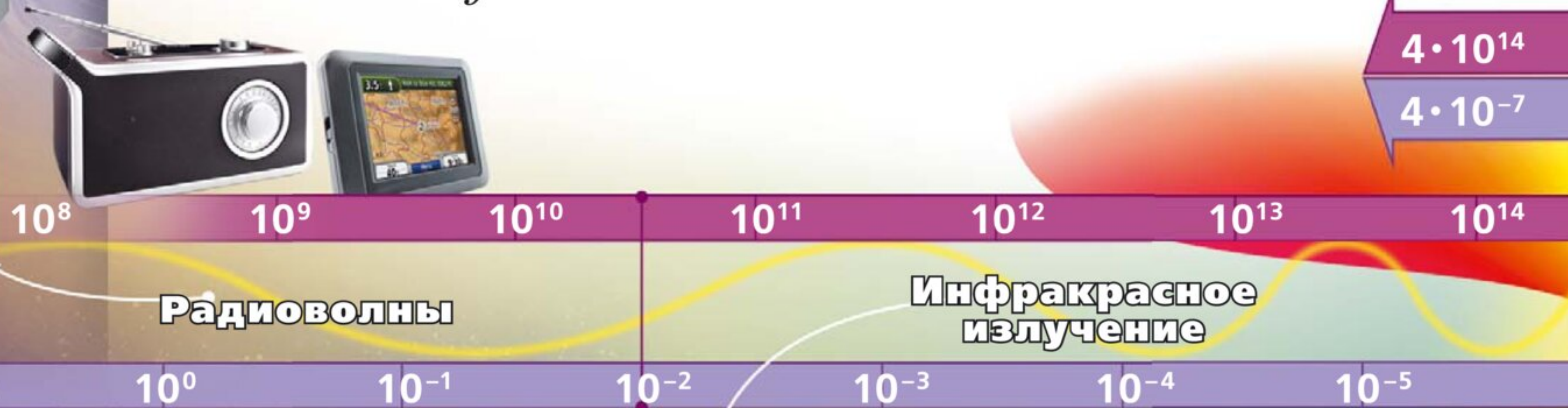
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВСЕЛЕННОЙ Электромагнитные волны, наполняющие нашу Вселенную, различаются главным образом по длине волны. Весь диапазон электромагнитных волн носит название *спектра электромагнитных излучений*. Отдельные части этого спектра принято различать по длине волны или по частоте. Учитывая, что все электромагнитные волны в вакууме распространяются со скоростью света ($c \approx 300\,000\text{ км/с}$), можно записать:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Спектр электромагнитных излучений включает в себя радиоволны, микроволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи и гамма-лучи.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном, изучавшим газовые разряды, было сделано выдающееся открытие. Он обратил внимание на то, что после подачи высокого напряжения между электродами трубки стекло вокруг анода начинало светиться зеленоватым светом. Далее Рентген установил, что разрядная трубка, обернутая чёрной бумагой, не пропускающей обычный свет, испускала неизвестное излучение, которое засвечивало фотопластинку, а также вызывало свечение экрана, покрытого солями бария. Это излучение Рентген назвал *X-лучами*. Более поздние исследования показали, что X-лучи представляют собой электромагнитные волны, которые излучают электроны при торможении в результате столкновения с анодом. В дальнейшем это излучение получило название *рентгеновских лучей*.

Холодный межзвёздный газ, остатки сверхновых звёзд, радиогалактики (галактики с мощным радиоизлучением)



Планеты, галактики (включая Млечный Путь)

Звёзды (собственное излучение), планеты (отражённый свет)

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ И РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Очень горячие космические объекты, например звёзды, испускают свет. В 1912—1914 гг. американский астроном В. Слайфер открыл эффект, который называют *космологическим красным смещением*. Это явление заключается в том, что спектральные линии от далёкого космического источника смещаются в сторону больших значений длин волн по сравнению с длиной волны тех же линий, измеренной от неподвижного источника. Другими словами, регистрируемая длина волны излучения далёкого источника, удаляющегося от нас с высокой скоростью, становится больше.

В 1929 г. Э. Хаббл открыл, что красное смещение для далёких галактик больше, чем для близких, и возрастает приблизительно пропорционально расстоянию между ними. Это открытие позволило сделать вывод о том, что Вселенная постоянно расширяется, а звёзды и галактики удаляются друг от друга и, в частности, от Земли. Если излучение проходит достаточно большое расстояние и красное смещение увеличивается, оно перестаёт быть видимым и становится сначала инфракрасным, а затем микроволновым. Это излучение называют *реликтовым*, и оно обнаруживается сегодня в виде микроволн, распространяющихся в космосе во всех направлениях.



Открыв природу электромагнитного излучения, человек освоил самые различные его виды. Радиоволны применяют в радио- и телевидении, а также в мобильной телефонии. Диапазон радиоизлучения, примыкающий к инфракрасному, часто называют микроволнами. Его также называют сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением, так как у него самая большая частота в радиодиапазоне. Микроволны используют в радиолокации, радионавигации, системах спутникового телевидения, мобильной телефонии и т. д.

Инфракрасные лучи человек ощущает кожей как тепло. Их используют в приборах ночного видения, которые позволяют нам видеть в темноте. На использовании видимой части электромагнитного спектра

основано устройство всех оптических приборов. Искусственные источники излучения видимого света (осветительные приборы) применяют для освещения улиц и помещений.

Ультрафиолетовые лучи мы используем в солярии для получения искусственного загара.

Рентгеновские лучи широко применяют в медицине при диагностике переломов и различных заболеваний внутренних органов. Они проникают сквозь мягкие ткани организма, но поглощаются более плотными тканями, включая костную. Гамма-лучи способны проникать даже сквозь металл, поэтому с их помощью можно обнаружить микротрещины в металлических конструкциях. Гамма-излучение также используют при лечении злокачественных опухолей.

Видимая часть спектра $8 \cdot 10^{14}$
 $8 \cdot 10^{-7}$



Звёзды
(в т. ч. Солнце)

Остатки сверхновых звёзд, ядра галактик, корона Солнца, разреженный горячий газ межгалактического пространства

Солнце
(гамма-излучение возникает при мощных солнечных вспышках)

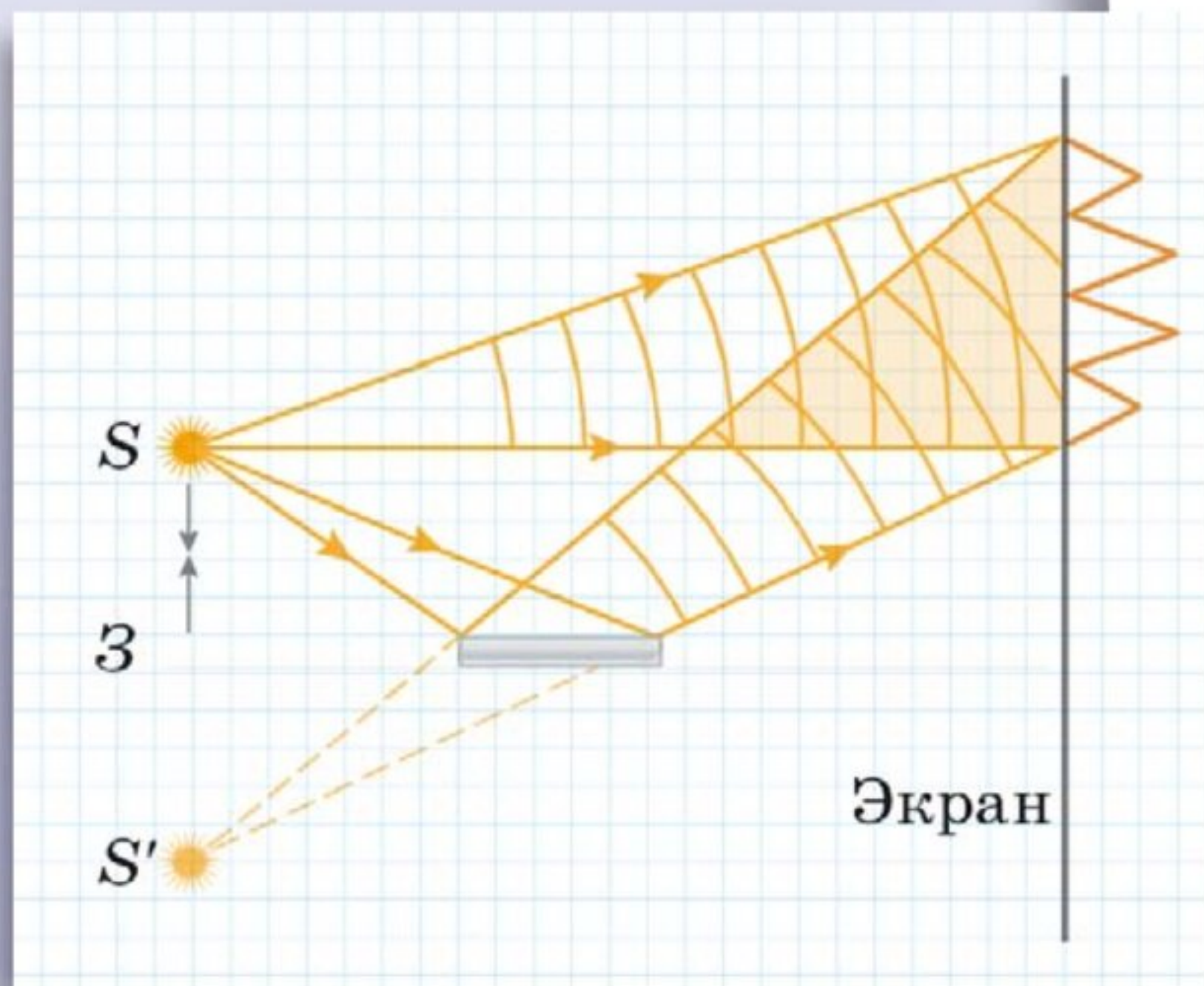
ВОПРОСЫ:

- Какие виды излучений входят в состав электромагнитного спектра?
- Какую роль электромагнитные волны играют в нашей жизни?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление длины световой волны при переходе из одной среды в другую.
- Как решать задачи на интерференцию и дифракцию световых волн.



ЗАДАЧА 1 Можно ли, располагая лишь одним точечным источником, экраном и плоским зеркалом, осуществить интерференцию световых волн?

Решение:

Для того чтобы на экране можно было наблюдать интерференционную картину, необходимо иметь по крайней мере два когерентных источника света. Этого можно добиться, поместив источник S вблизи поверхности плоского зеркала Z . В этом случае на экран будут падать две когерентные волны: одна непосредственно от источника, другая в результате отражения световой волны от зеркала. При этом мнимое изображение S' источника S в зеркале можно рассматривать в качестве второго источника.

Ответ: да.

ЗАДАЧА 2 Длина волны жёлтого цвета в вакууме составляет 580 нм. Чему равна длина волны жёлтого цвета в воде? Показатель преломления воды 1,33.

Дано:
 $\lambda_{\text{вак}} = 580 \text{ нм}$
 $n = 1,33$
 $\lambda_{\text{вод}} = ?$

Решение:

При переходе света из вакуума в воду изменяется скорость распространения света:

$$v = \frac{c}{n}$$

Запишем выражение для длины волны в вакууме и в воде:

$$\lambda_{\text{вак}} = \frac{c}{\nu}, \text{ где } \nu \text{ — частота жёлтого цвета, } \nu = \frac{c}{\lambda_{\text{вак}}};$$

$$\lambda_{\text{вод}} = \frac{v}{\nu} = \frac{c/n}{c/\lambda_{\text{вак}}} = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n}.$$

Подставляя численные значения, получим

$$\lambda_{\text{вод}} = \frac{580 \text{ нм}}{1,33} = 436 \text{ нм}.$$

Ответ: $\lambda_{\text{вод}} = 436 \text{ нм}$.

ЗАДАЧА 3 В опыте Юнга свет с длиной волны 560 нм попадает через щель на ширму с двумя узкими щелями, расположенными на расстоянии 1 мм друг от друга. В результате на экране, удалённом на 2 м от щелей, наблюдается интерференционная картина. Определите расстояние между соседними интерференционными максимумами.

Дано:
 $\lambda = 560 \text{ нм}$
 $d = 1 \text{ мм}$
 $l = 2 \text{ м}$

СИ
 $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
 $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$s = ?$

Решение:

В точках A и B будут наблюдаться соседние максимумы интерференции.

При переходе световой волны из одной среды в другую изменяется скорость распространения волны, что приводит к изменению длины волны. Частота световой волны не изменяется. Именно частота определяет цвет световой волны. Поэтому при переходе света из одной среды в другую цвет световой волны не изменяется.

Из условия максимумов следует, что на разности хода укладывается целое число длин волн:

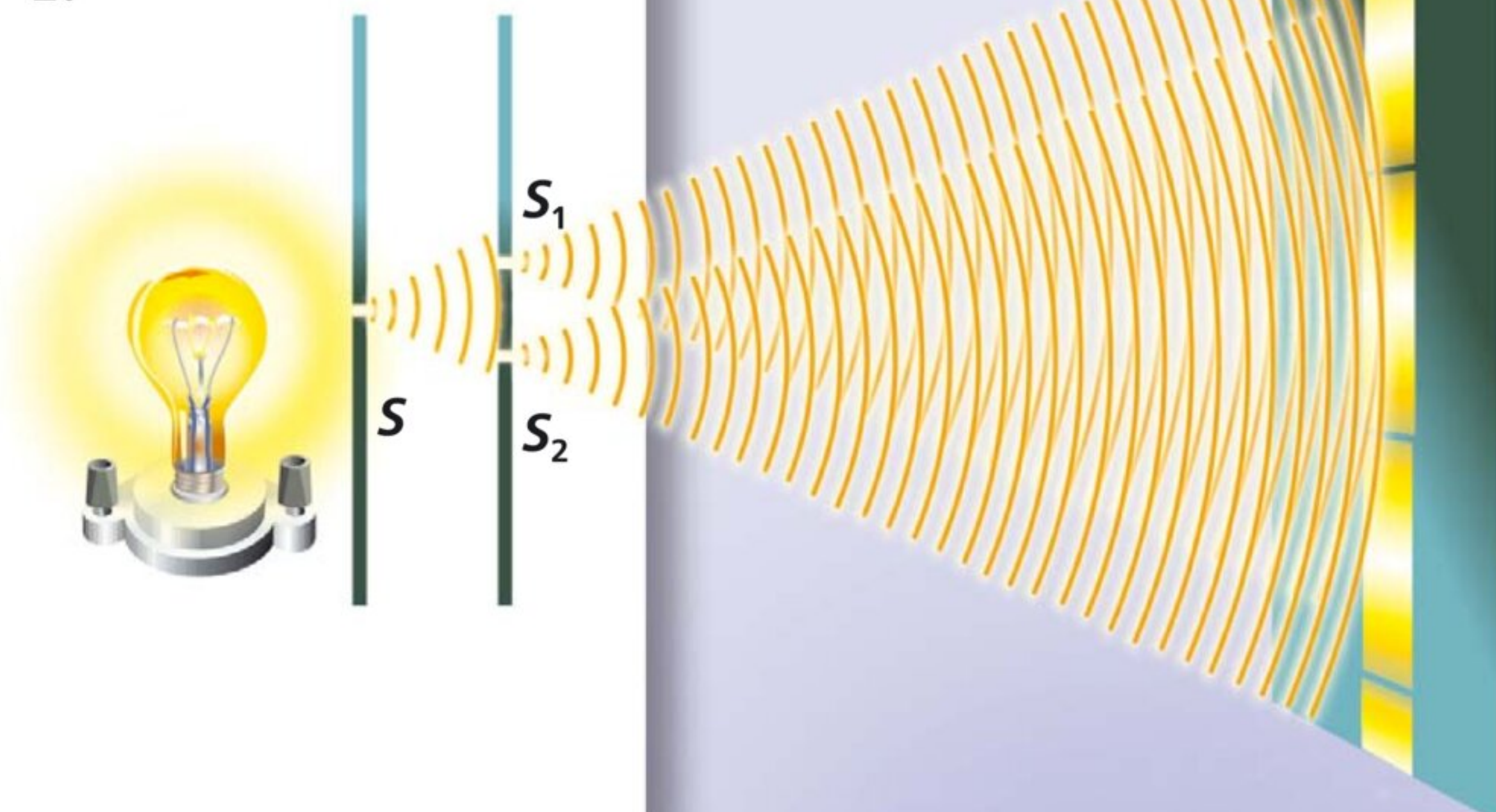
$$\Delta = m\lambda, \text{ для точки } B \text{ } m = 1.$$

Разность хода волн в точке B :

$$\Delta = s_2 - s_1.$$

Используя теорему Пифагора для прямоугольных треугольников $\triangle S_1BC$ и $\triangle S_2BD$, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} s_1^2 = l^2 + \left(s - \frac{d}{2}\right)^2 \\ s_2^2 = l^2 + \left(s + \frac{d}{2}\right)^2 \end{cases}$$



Вычитая первое уравнение из второго, получим

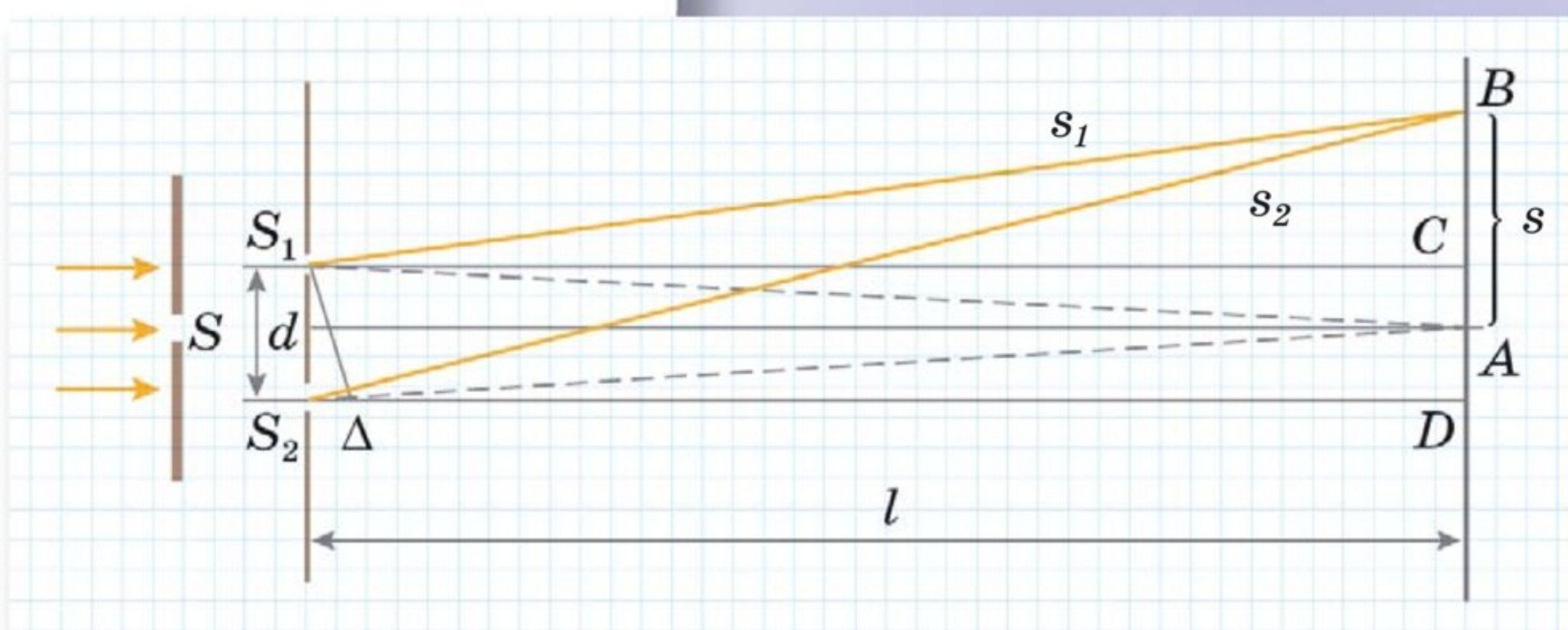
$$\begin{aligned} s_2^2 - s_1^2 &= 2sd; \\ (s_2 - s_1)(s_2 + s_1) &= 2sd. \end{aligned}$$

Так как $s_2 - s_1 = \Delta$, $s_2 \approx s_1 \approx l$, $s_2 + s_1 \approx 2l$, то

$$2l\Delta = 2sd.$$

Для $m = 1$ $\Delta = \lambda$, поэтому

$$\begin{aligned} l\lambda &= sd \rightarrow s = \frac{l\lambda}{d}. \\ s &= \frac{2 \text{ м} \cdot 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,12 \text{ мм}. \end{aligned}$$



Ответ: $s = 1,12 \text{ мм}$.

ЗАДАЧА 4 На дифракционную решётку падает нормально монохроматический свет с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$. Чему равен период дифракционной решётки, если максимум третьего порядка наблюдается под углом 10° ?

Дано:
 $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$
 $\theta = 10^\circ$
 $m = 3$

СИ
 $6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

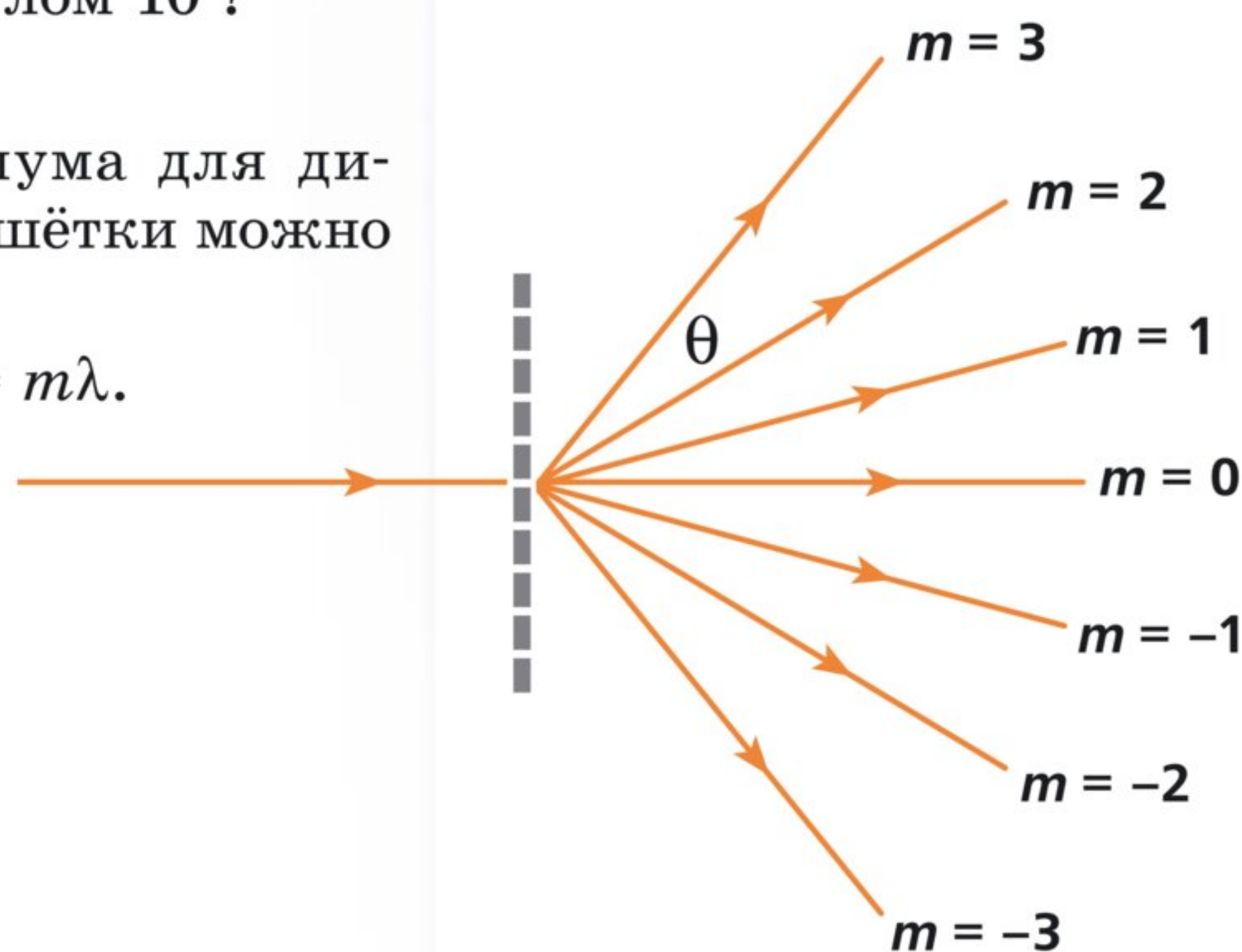
Решение:
Условие максимума для дифракционной решётки можно записать в виде
 $d \sin \theta = m\lambda$.

$d = ?$

$$\text{Отсюда } d = \frac{m\lambda}{\sin \theta};$$

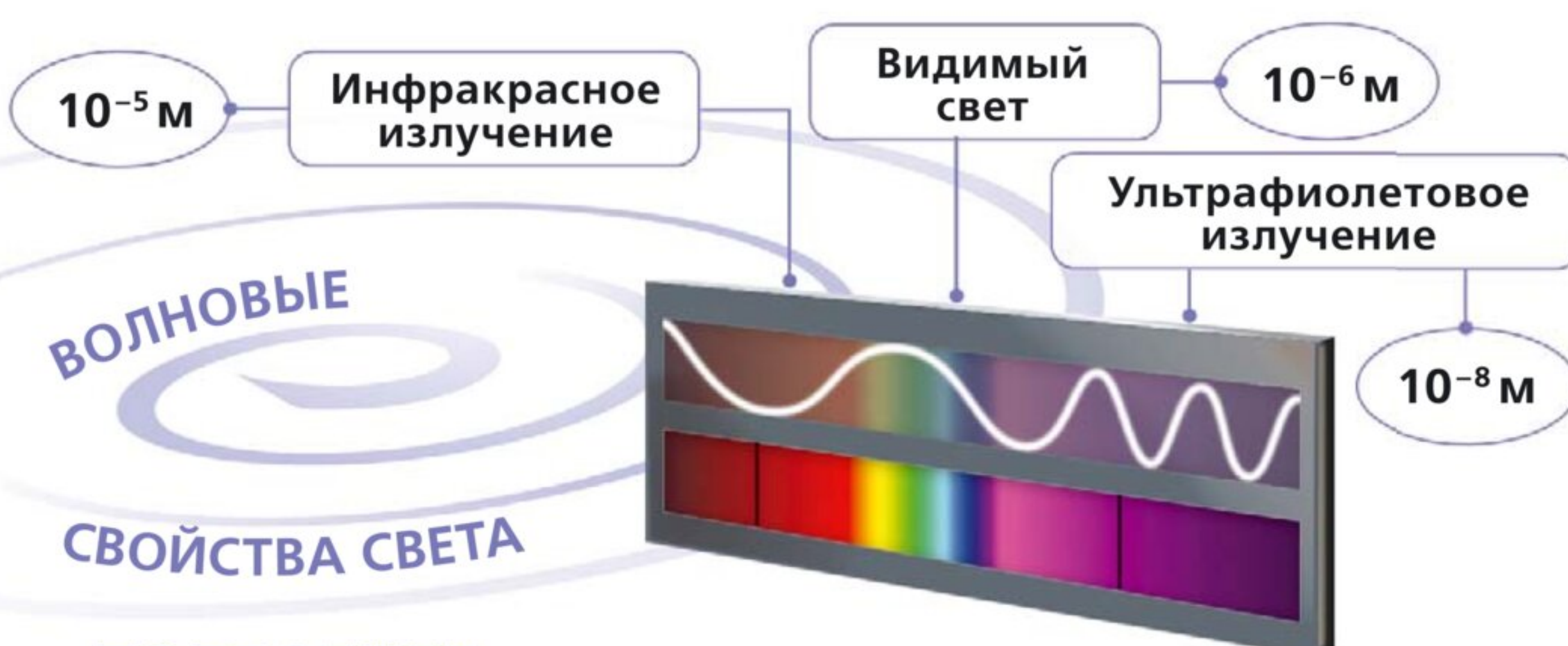
$$d = \frac{3 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{\sin 10^\circ} \approx 10^{-5} \text{ м}.$$

Ответ: $d \approx 10^{-5} \text{ м}$.



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Скорость света в вакууме составляет 300 000 км/с. Скорость света в среде зависит от свойств среды.
- Зависимость показателя преломления среды от цвета световых лучей называется дисперсией.
- Волновую теорию света сформулировал Х. Гюйгенс.
- Волновым фронтом называется совокупность всех точек пространства, которых волновое возмущение достигает в один и тот же момент времени. Каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн.
- Когерентными называются волны, которые имеют одинаковые длины волн и неизменную разность фаз в любой точке пространства. При наложении когерентных световых волн осуществляется интерференция света.
- Свет представляет собой электромагнитные волны.
- Атомы каждого химического элемента испускают излучение, спектр которого непохож на спектры других элементов. Метод определения химического состава вещества по его спектру называют спектральным анализом.



ПОДРОБНЕЕ...

Филонович С.Р. Самая большая скорость. Вып. 27. / С. Р. Филонович. — М.: Наука, 1983. — (Библиотечка «Квант»).

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Для каких лучей — красных или фиолетовых — будет больше фокусное расстояние собирающей линзы? Изменится ли ответ для рассеивающей линзы?
- Почему интерференционная окраска одного и того же места поверхности мыльного пузыря непрерывно меняется?
- Можно ли наблюдать дифракцию света с помощью металлической линейки, снабжённой миллиметровыми делениями, т.е. используя её в качестве дифракционной решётки?
- Что можно узнать о составе сплава при изучении яркости спектральных линий в его спектре?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Научно-популярный
журнал «Наука и жизнь»
<http://gotourl.ru/13729>



ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ К ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



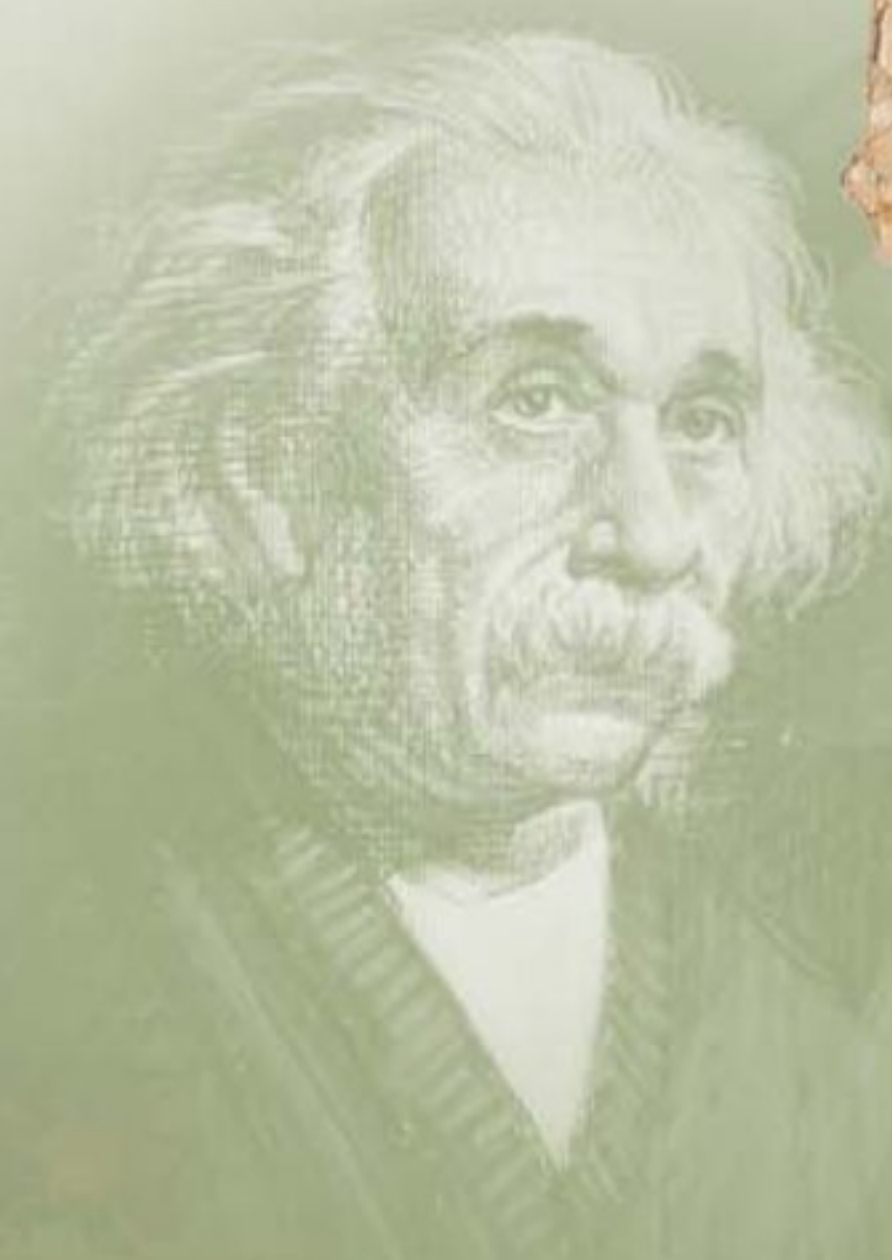
РАЗДЕЛ IV

К концу XIX в. уже были созданы классическая механика и физика тепловых явлений — молекулярная физика и термодинамика, изучены электрические и магнитные явления и их взаимосвязь, обнаружены электромагнитные волны и установлено, что свет также является электромагнитной волной. Американский физик А. Майкельсон в конце XIX в. сказал: «Все основные физические принципы уже открыты ... поиск физических истин теперь ограничен лишь уточнением цифр в шестом знаке после запятой». Однако жизнь опровергла этот прогноз.

В физике того времени существовало представление, что мировое пространство заполнено эфиром — невидимой и неосязаемой субстанцией, в которой электромагнитные волны распространяются наподобие того, как в воздухе распространяются звуковые волны. Из уравнений Максвелла следовало, что свет — это электромагнитная волна, которая распространяется в пространстве с конечной скоростью. При этом сам Максвелл также считал, что распространение света происходит в эфире. В 1887 г. американские физики Майкельсон и Морли решили провести эксперимент, в котором хотели доказать существование эфира и измерить скорость движения Земли относительно него. К их удивлению, свет, испущенный по направлению движения Земли, и свет, испущенный перпендикулярно направлению движения Земли, одно и то же расстояние проходил за одно и то же время, т. е. скорость света в этих опытах не зависела от скорости движения источника. Эти результаты противоречили принципу относительности Галилея и закону сложения скоростей.

Разрешить это противоречие удалось А. Эйнштейну в 1905 г., когда он заложил основы специальной теории относительности. В работе «Эволюция физики» он писал: «Создание новой теории не похоже на разрушение старого амбара и возведение на его месте небоскрёба. Оно скорее похоже на восхождение на гору, которое открывает новые и широкие виды, показывающие неожиданные связи между нашей отправной точкой и её богатым окружением. Но точка, от которой мы отправлялись, ещё существует и может быть видна, хотя она кажется меньше и составляет крохотную часть открывшегося нашему взору обширного ландшафта».

Остановимся подробнее на противоречиях, которые привели к открытию теории относительности и в конечном итоге к рождению современной физики. Принцип относительности Галилея, который лёг в основу первого закона Ньютона, гласит: «Если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и в любой другой системе, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой». Для иллюстрации принципа относительности Галилей использует пример с кораблём, Эйнштейн — пример с поездом. Суть этих примеров состоит в том, что если окна в помещении плотно закрыты, то никакие физические опыты и самые точные измерения



не позволят нам отличить равномерное прямолинейное движение от состояния покоя. При этом установить скорость равномерного прямолинейного движения нашей системы отсчёта мы можем только относительно другой известной нам системы отсчёта.

Представим себе летательный аппарат, движущийся в межзвёздном пространстве (вакууме) со скоростью $\vec{v}$ и испускающий луч света. Известно, что свет — это электромагнитная волна, и скорость её распространения в вакууме $c = 300\,000\text{ км/с}$. Тогда для неподвижного относительно звездолёта наблюдателя свет должен был бы распространяться со скоростью $c + v$ по направлению движения и со скоростью $c - v$ в противоположном направлении. Однако ни один опыт не подтвердил зависимость скорости света от скорости движения его источника, во всех экспериментах скорость света в вакууме оставалась постоянной для различных систем отсчёта.

Получалось, что либо принцип относительности Галилея пригоден только для механики и не распространяется на электромагнитные явления, либо для преодоления сложившегося противоречия нужно изменить уравнения Максвелла таким образом, чтобы скорость света не менялась при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой при применении классических преобразований скоростей. Такую попытку предпринял, например, Герц. Но все попытки видоизменить уравнения электродинамики также оказались неудачными и не прошли проверку экспериментом.

Выход из сложившейся ситуации удалось найти гениальному физiku А. Эйнштейну. В 1905 г., в возрасте 26 лет, Эйнштейн опубликовал в журнале «Annalen der Physik» («Анналы физики») статью «К электродинамике движущихся тел», в которой он сформулировал более общий принцип относительности, применимый и к законам электромагнетизма, и к механике. Тем самым были заложены основы специальной теории относительности (СТО). Одним из следствий этой теории является то, что абсолютное движение невозможно обнаружить в эксперименте. «Я из общих соображений был твёрдо убеждён в отсутствии абсолютного движения...» — писал позже Эйнштейн. Новая теория не только объяснила противоречия, о которых говорилось выше, но и позволила сформировать новый взгляд на такие фундаментальные понятия, как пространство и время. Специальная теория относительности неоднократно подтверждена экспериментально, например в физике высоких энергий.

Если в специальной теории относительности Эйнштейн коренным образом изменил наши представления о пространстве и времени, то в общей теории относительности, созданной в 1915 г., он связал гравитацию с геометрией пространства. «Развивая эти идеи, Эйнштейн выдвинул чрезвычайно красивую гипотезу, на которой основана его известная теория гравитации... Это, пожалуй, одна из самых красивых и изящных физических теорий», — писал Луи де Бройль в книге «Революция в физике». Работы Эйнштейна произвели коренную ломку существующих на тот момент представлений, однако эти работы не опровергли работ Галилея и Ньютона.



Глава 8

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

- ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. ОДНОВРЕМЕННОСТЬ
- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА
- ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ ДЛИНЫ. ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ
- РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ
- ЧЕТЫРЁХМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО—ВРЕМЯ
- РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МАССА, ЭНЕРГИЯ, ИМПУЛЬС
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ IV



ЭЛЕМЕНТЫ
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Значение теории относительности простирается на все процессы природы, начиная от радиоактивности, волн и корпускул, излучаемых атомом, и вплоть до движения небесных тел, удалённых от нас на миллионы лет.

М. Планк

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Постулаты специальной теории относительности.
- Что такое относительность одновременности.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое инерциальные системы отсчёта?

Ричард Фейнман в своих лекциях писал: «Более 200 лет считалось, что уравнения движения, провозглашённые Ньютоном, правильно описывают природу, и когда впервые в этих законах была обнаружена ошибка, тогда же был найден и способ её исправления. И ошибка, и способ её исправления были найдены Эйнштейном в 1905 году».

ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. ОДНОВРЕМЕННОСТЬ

Открытие А. Эйнштейном теории относительности изменило взгляды на пространство и время. Идеи, заложенные в этой теории, долгое время вызвали споры и непонимание среди учёных. Однако спустя более чем 100 лет, прошедших со времени опубликования работ Эйнштейна, физикам удалось получить многочисленные экспериментальные подтверждения этой теории. Формулы теории относительности используются сегодня при создании сложных технических систем, например, таких как коллайдеры и спутниковые системы глобальной навигации.

ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В основе специальной теории относительности лежат два постулата:

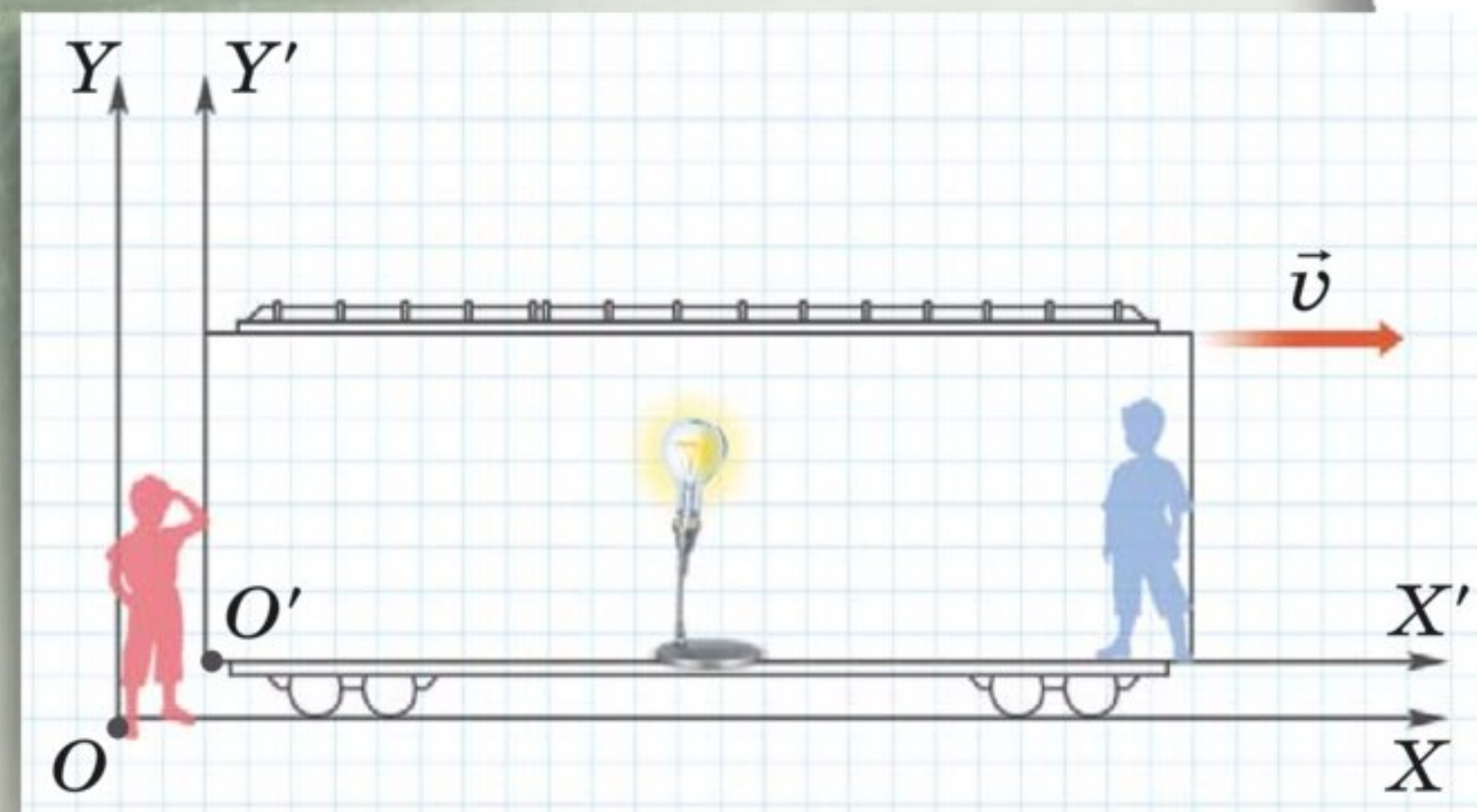
1. Законы природы одинаковы во всех системах отсчёта, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Этот постулат обобщает принцип относительности Галилея для механических явлений на все физические процессы и явления в природе (в том числе и электромагнитные).

2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приёмника светового сигнала.

Из этих постулатов следует, что скорость света в вакууме играет в физике особую роль: она является максимально возможной скоростью в природе. Эйнштейн писал: «Теория относительности начинается с этих двух положений... В данном случае, как и всегда в науке, важно отказаться от глубоко укоренившихся, часто некритически повторяемых предрассудков. Так как мы видели, что изменения обоих положений приводят к противоречию с экспериментом, то мы должны иметь смелость твёрдо установить их справедливость...»

ПОНЯТИЕ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

Постулаты специальной теории относительности заставляют по-новому взглянуть на понятия, казавшиеся до этого ясными, например на понятие времени. «Что мы обозначаем словами: два одновременных события в одной системе координат? Интуитивно каждый человек считает, что он понимает смысл этого предложения. Но будем осторожными и постараемся дать строгие определения, так как мы знаем, как опасно переоценивать интуицию», — писал Эйнштейн. Он предложил поставить следующий мысленный эксперимент. Пусть один наблюдатель, внутренний, находится в комнате, в самом центре которой расположен источник света. Так как расстояние от источника света до стен одинаковое и скорость света во всех направлениях одинаковая, то внутренний наблюдатель видит, что свет достигает стен *одно-*



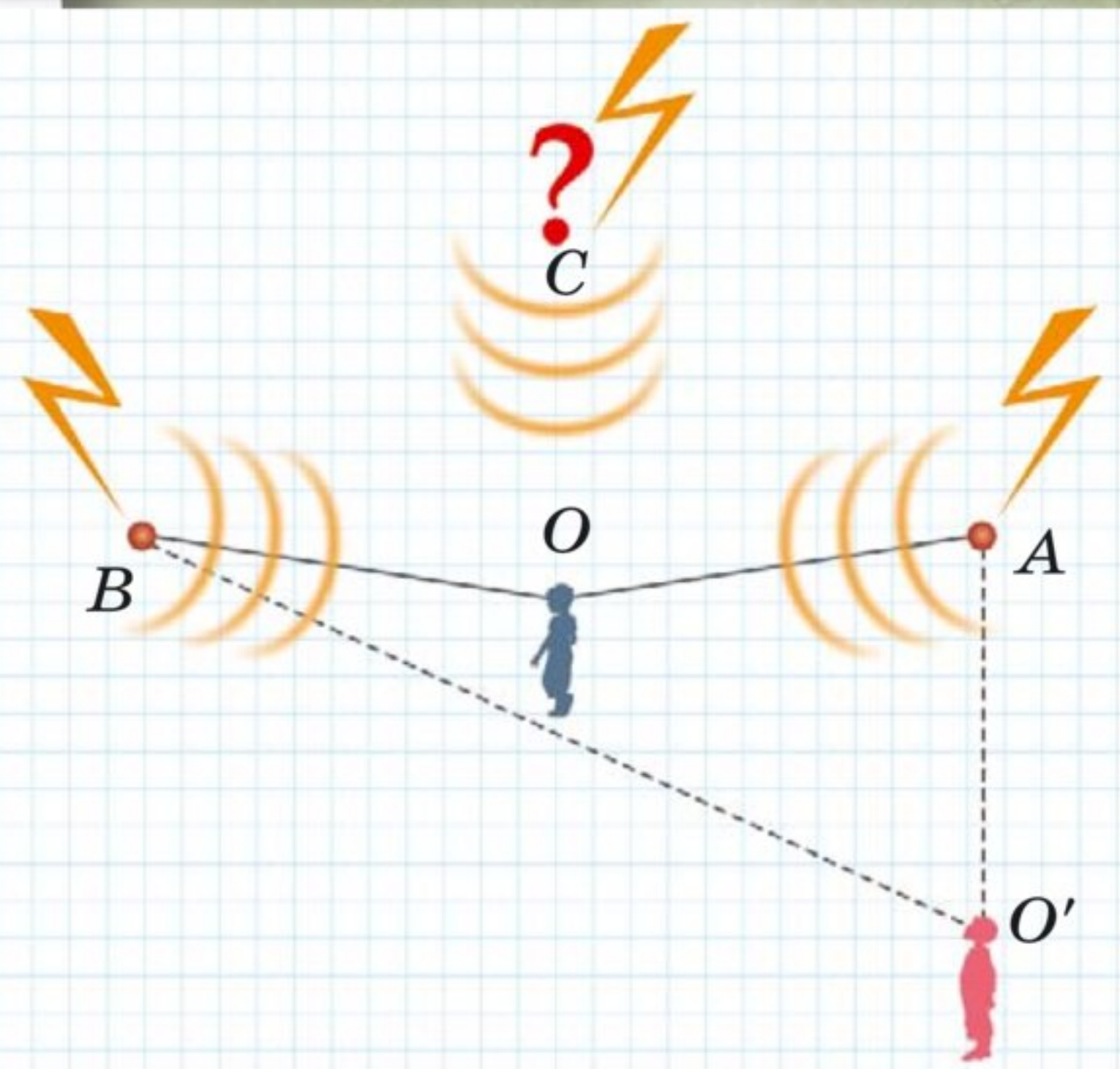
временно. Пусть эта комната вместе с внутренним наблюдателем движется со скоростью $\vec{v}$ относительно другого, внешнего, наблюдателя. Тогда дальняя стена комнаты, по мнению внешнего наблюдателя, «убегает» от света, испущенного источником в центре комнаты, а ближайшая к нему стена, наоборот, приближается к источнику света. Во внешней системе отсчёта скорость света точно такая же, как и во внутренней, поэтому для внешнего наблюдателя «убегающая» стена будет достигнута световым сигналом немного позднее, чем приближающаяся. «Сравнивая предсказания обоих наблюдателей, мы обнаруживаем крайне изумительный результат, который явно противоречит несомненно хорошо обоснованным понятиям классической физики. Оба события — достижение стен двумя световыми лучами — *одновременны для наблюдателя внутри и не одновременны для наблюдателя вне комнаты*». Наверное, очень хочется задать вопрос: «Какой из наблюдателей прав?» Конечно же, правы оба.

Давайте обсудим ещё один мысленный эксперимент. Представим себе наблюдателя O , находящегося на равном расстоянии от точек A и B . Пусть в этих точках произошли события, сопровождающиеся вспышкой света. Когда наблюдатель узнает об этих событиях? Когда свет, имеющий конечную скорость, достигнет его глаз. Какие выводы может сделать наблюдатель об одновременности или неодновременности произошедших событий? Если свет из точек A и B достиг нашего наблюдателя в одно и то же время и он знает, что расстояния от него до этих точек одинаковое, то он будет считать, что оба события произошли одновременно. А как эти события будут выглядеть для другого наблюдателя O' , расстояния от которого до точек A и B неодинаковые? Какие выводы может сделать наш первый наблюдатель о событии в некоторой другой точке C , свет от которого достиг его позже, чем свет от событий в точках A и B ? Свои заключения он должен основывать на знании о расстоянии до точки C , так как, не зная положения точки C , ничего определённого сказать о времени произошедшего события невозможно. Оно могло произойти и раньше событий в точках A и B , и одновременно с ними, и позже.

Таким образом, *два события, одновременные с точки зрения одного наблюдателя, не обязательно должны быть одновременными с точки зрения другого наблюдателя*. Не существует «наилучшей» системы отсчёта, чтобы определить, кто из наблюдателей прав.

Единственный вывод, который мы можем сделать, состоит в том, что *одновременность — понятие не абсолютное, а относительное*. В повседневной жизни мы не можем почувствовать относительность понятия одновременности, так как оно становится заметно лишь тогда, когда относительная скорость двух систем отсчёта очень велика (близка к скорости света) или соответствующие расстояния достаточно велики.

Понятие относительности одновременности заставляет задуматься о том, что же такое часы. «В качестве часов может быть использовано любое физическое явление, если только оно может быть повторено столько раз, сколько необходимо. Если мы возьмём интервал между началом и концом такого события за единицу времени, то любые интервалы времени можно измерить повторением этого физического процесса», — писал Эйнштейн. Тогда как же нам синхронизировать различные часы? Для этой цели разумнее всего использовать электромагнитные сигналы, так как скорость их распространения постоянна и не зависит от скорости движения ни приёмника, ни источника сигнала. Именно так сегодня и синхронизируют часы: с использованием радио, телевидения или сигналов в Интернете. В качестве эталона измерения времени уже достаточно давно используют атомные часы, которые пришли на смену астрономической системе отсчёта времени, привязанной к процессу вращения Земли вокруг собственной оси.



ЗАДАНИЯ:

- Сформулируйте постулаты специальной теории относительности.
- Приведите примеры, разъясняющие понятие относительности одновременности.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Преобразования Галилея.
- Преобразования Лоренца.

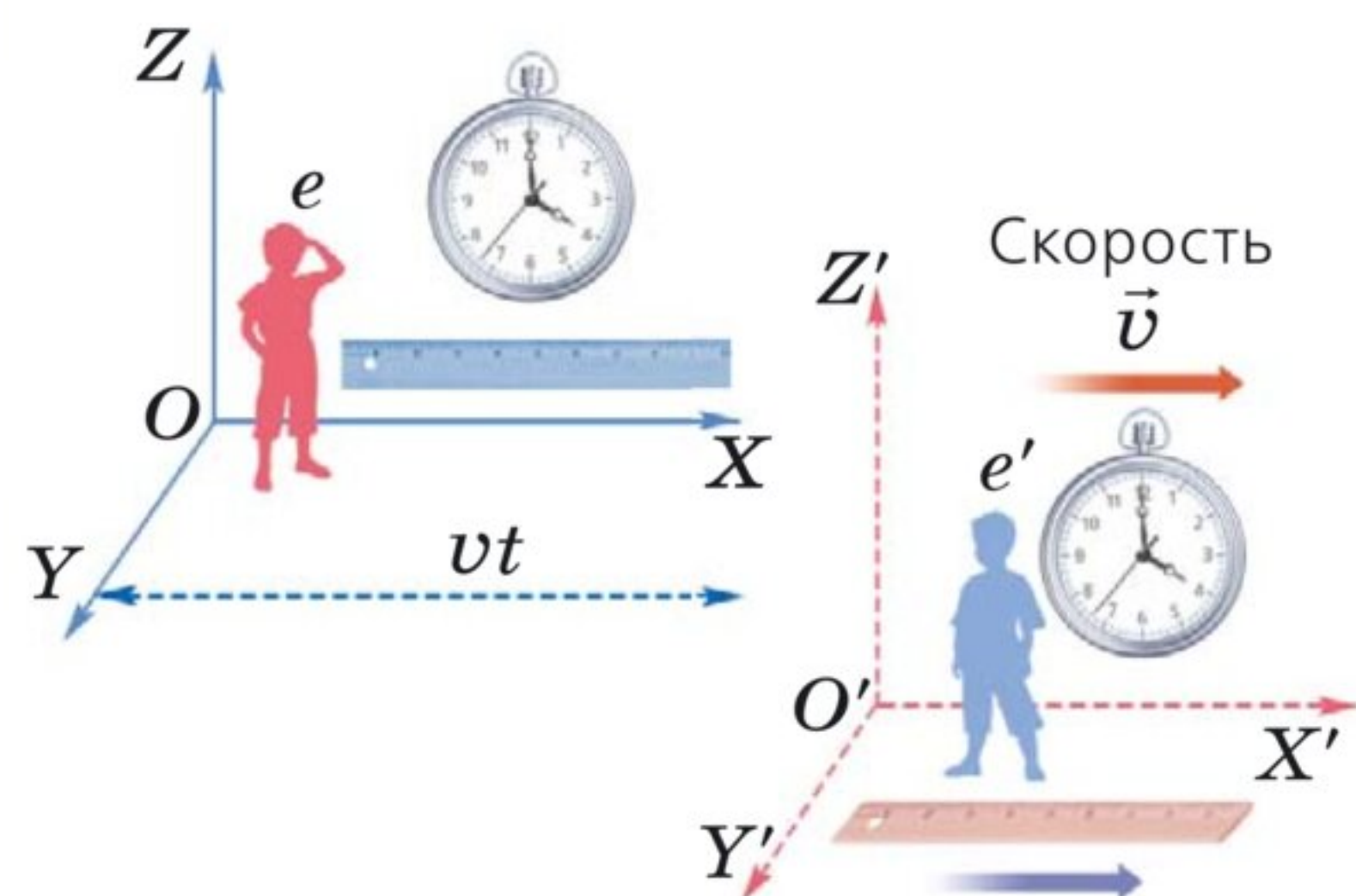
ВСПОМНИТЕ:

- Постулаты специальной теории относительности.



Хендрик Антон Лоренц
(1853—1928)

Нидерландский физик, исследователь в области электродинамики, лауреат Нобелевской премии по физике.



Обратные преобразования, связывающие наблюдения e и e' , имеют вид

$$\begin{aligned}x &= x' + vt, \\y &= y', \\z &= z', \\t &= t'.\end{aligned}$$

Оба типа преобразований равноправны для обоих наблюдателей и указывают на наличие относительной скорости наблюдателей друг относительно друга.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

Сформулировав постулаты специальной теории относительности, Эйнштейн осознал то, что классические преобразования координат и скоростей, называемые преобразованиями Галилея, неверны в общем случае. В 1904 г. Лоренц предложил другое преобразование координат для перехода из одной инерциальной системы в другую, которое делало уравнения электродинамики инвариантными. По предложению Пуанкаре эти преобразования названы преобразованиями Лоренца.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ

Представим себе, что первый наблюдатель (e) описывает события в своей лаборатории, используя часы и линейку. Вторым наблюдатель (e'), движущийся мимо этой лаборатории с постоянной скоростью $\vec{v}$, описывает эти же события так, как видит их он, используя такие же часы и линейку, как и первый наблюдатель. С каждым из них связаны системы отсчёта: с наблюдателем e — система XYZ , а с наблюдателем e' — система $X'Y'Z'$. Для удобства предположим, что наблюдатели запускают свои часы ($t = 0$, $t' = 0$) в тот момент, когда совпадают начала их систем и оси координат.

Допустим, что, по мнению наблюдателя e , событие произошло в момент t в точке (x, y, z) по отношению к своим осям. Наблюдатель e' регистрирует то же событие с помощью своих приборов: оно происходит в момент t' и в точке (x', y', z') по отношению к движущимся вместе с ним осям координат.

Исходя из нашего жизненного опыта можно утверждать, что время для обоих наблюдателей будет одним и тем же: $t = t'$. Пусть относительная скорость наблюдателей равна v м/с и направлена вдоль оси OX . Тогда координаты y и z для обоих наблюдателей будут совпадать: $y' = y$, а $z' = z$. Но так как наблюдатель e' вместе со своей системой координат переместился за время t от наблюдателя e на расстояние vt метров, его координаты x' будут на vt метров меньше, так что x' должно быть равно $x - vt$. Итак,

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}\tag{1}$$

Эти соотношения называются *преобразованиями Галилея* и отражают классический взгляд на пространство и время.

ГАЛИЛЕЕВО ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ

Если наблюдатель e видит движущееся вдоль оси OX тело и измеряет его скорость u отношением $\Delta x / \Delta t$, то, по мнению наблюдателя e' , связанного с системой отсчёта $X'Y'Z'$, то же тело движется со скоростью u' , равной $\Delta x' / \Delta t'$. Использование алгебры и преобразований Галилея показывает, что

$u' = u - v$, где v — скорость, с которой система отсчёта $X'Y'Z'$ движется относительно системы отсчёта XYZ . Это классический закон сложения скоростей. Оказалось, что этот закон не выполняется в общем случае. Это становится особенно заметно при движениях со скоростями, близкими к скорости света. Но для повседневной жизни классический закон сложения скоростей выполняется с достаточной точностью.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА Нидерландский физик-теоретик Хендрик Антон Лоренц, анализируя тот факт, что уравнения электромагнетизма Максвелла не инвариантны относительно преобразований Галилея, вывел преобразования, названные впоследствии его именем.

Лоренц был сторонником теории эфира — всепроникающей среды, необходимой для распространения электромагнитных волн. Он предположил, что длины всех тел, движущихся со скоростью $\vec{v}$ по отношению к эфиру, сокращаются

$$\text{в } 1/\sqrt{1-(v^2/c^2)} \text{ раз.}$$

С точки зрения математики введение такого сокращения устраняло возникающие противоречия. Но с точки зрения физики такой результат понять было затруднительно. Год спустя Эйнштейн на основе своей теории относительности вывел формулы, совпадающие с преобразованиями Лоренца.

Преобразования Лоренца устанавливают связь между временем и координатами, измеренными наблюдателями e и e' , движущимися относительно друг друга со скоростью $\vec{v}$:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, & y' &= y, & t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \\ z' &= z, \end{aligned} \quad (2)$$

«Важно было понять причины, по которым преобразования Галилея необходимо заменить преобразованием Лоренца, и выяснить физические следствия этой замены. Это сделал Эйнштейн при помощи тонкой и глубокой критики понятий пространства и времени... Эйнштейн провёл глубокий критический анализ экспериментальных методов измерения пространства и времени. При этом в качестве основного положения он принял постулат, согласно которому никакая энергия, никакой сигнал не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света в пустоте, а скорость распространения света в пустоте постоянна и не зависит от направления распространения. Существование этой верхней границы для скорости распространения сигналов позволило вывести формулы преобразования Лоренца и понять их физический смысл», — писал выдающийся французский физик Луи де Бройль в книге «Революция в физике».

Суть принципа относительности Галилея состоит в том, что если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и в любой другой системе координат, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно.

При преобразованиях Галилея существуют величины, которые не зависят от выбора системы отсчёта.

Расстояние между двумя точками: $\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 + vt - x'_1 - vt = x'_2 - x'_1$ не меняется при преобразовании Галилея, т. е. является инвариантным. Поскольку силы в механике зависят от взаимного расположения материальных точек или тел, то силы также не меняются при преобразованиях Галилея.

Изменение скорости — тоже инвариантная величина при преобразованиях Галилея: $\Delta v = u_2 - u_1 = u'_2 + v - u'_1 - v = u'_2 - u'_1$. Поскольку в классической механике Δt инвариантно в любых инерциальных системах отсчёта, то из инвариантности изменения скорости следует и инвариантность величины ускорения: $a = \Delta v / \Delta t$.

Следовательно, установив справедливость закона Ньютона $F = ma$ хотя бы в одной системе, можно утверждать, что он справедлив и в любой другой инерциальной системе.

ВОПРОСЫ:

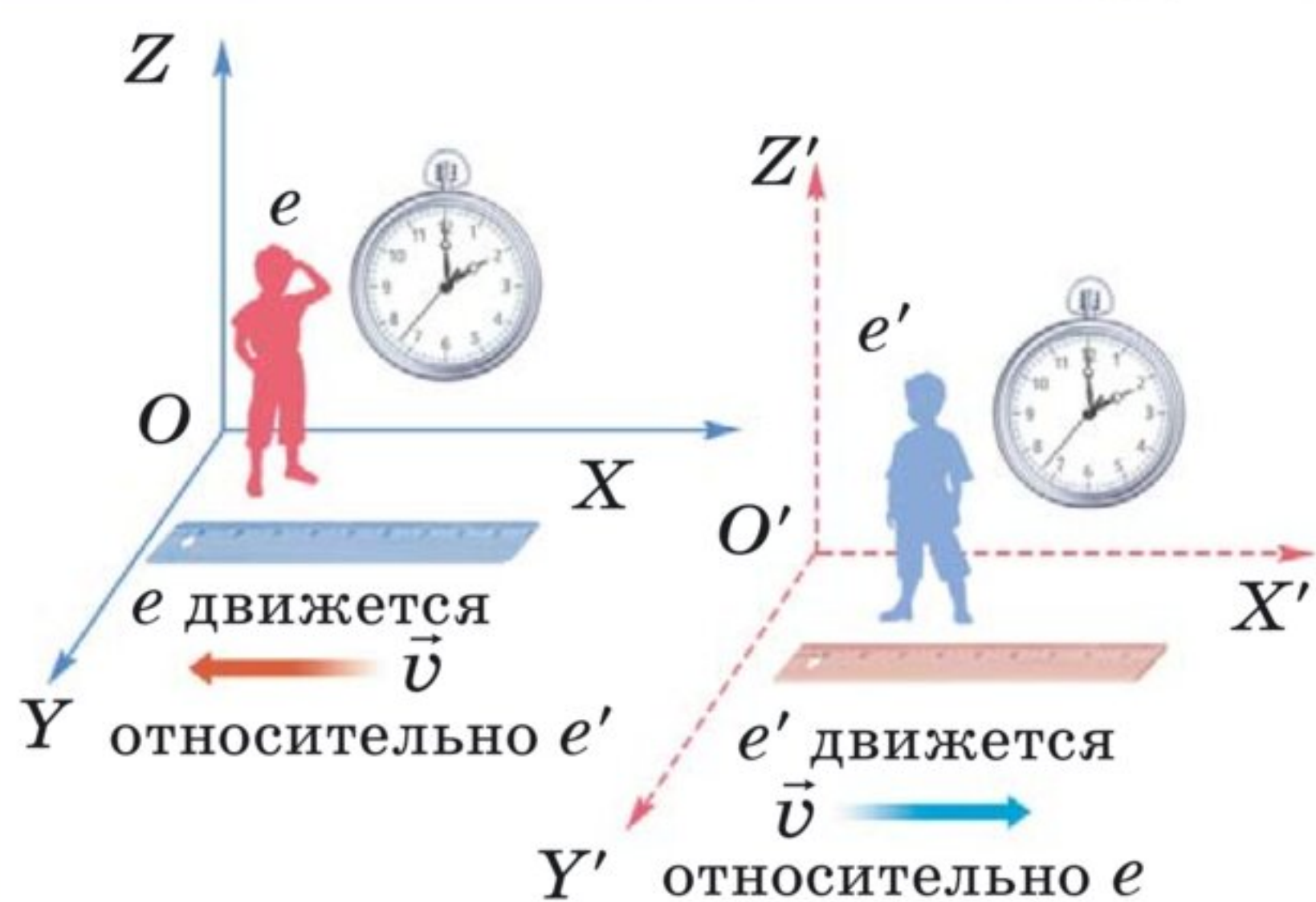
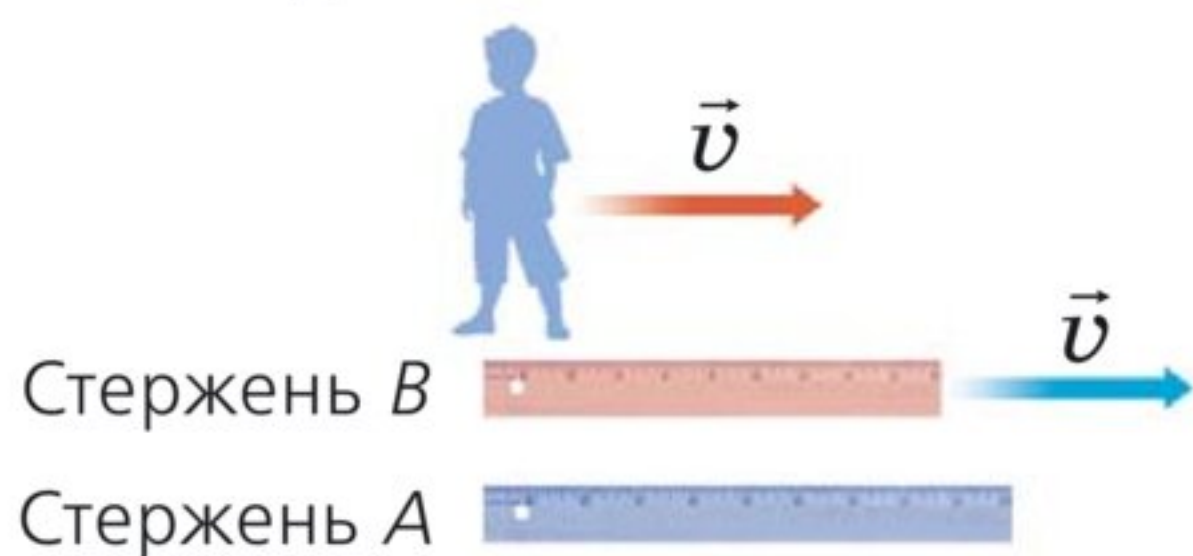
- Что такое преобразования Галилея?
- Что такое преобразования Лоренца?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое относительность расстояний.
- Что такое относительность промежутков времени.

ВСПОМНИТЕ:

- Постулаты специальной теории относительности.
- Что такое относительность одновременности?

Наблюдатель e' 

Пусть мимо нас движется метровый стержень ($l_0 = 1$ м) со скоростью $v = 0,8c$ (c — скорость света в вакууме). Какова длина этого стержня, измеренная в нашей системе отсчёта?

$$l = 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}} = \sqrt{1 - 0,64} = \sqrt{0,36} = 0,6 \text{ м} = 60 \text{ см}$$

ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ ДЛИНЫ. ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Давайте рассмотрим важнейшие следствия из постулатов специальной теории относительности. Оказывается, что не только промежутки времени, но и расстояния являются относительными и различаются для разных наблюдателей, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно. Эти результаты достаточно сложно представить себе с точки зрения нашего жизненного опыта, но они проявляются только при чрезвычайно больших скоростях, сравнимых со скоростью света.

ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ ДЛИНЫ

Пусть два наблюдателя e и e' описывают события каждый в своей лаборатории, используя часы и линейку. При этом лаборатория наблюдателя e' движется мимо лаборатории наблюдателя e с постоянной скоростью $\vec{v}$. С каждым из них связаны системы отсчёта: с наблюдателем e — система XYZ , а с наблюдателем e' — система $X'Y'Z'$. Преобразования из системы отсчёта e в систему отсчёта e' полностью симметричны и говорят только об одной и той же в обоих случаях относительной скорости $\vec{v}$. Каждый из наблюдателей в своей лаборатории обнаружит одни и те же законы механики и одну и ту же скорость распространения световых сигналов. Однако, если бы наблюдатель e посмотрел на метровую линейку наблюдателя e' , он бы заметил, что она короче его метровой линейки. При этом наблюдатель e' не обнаружил бы в своей лаборатории никаких изменений длины своей линейки, а наоборот, подумал бы, что линейка наблюдателя e короче.

Этот эффект объясняется тем, что расстояние между двумя точками тела, измеряемое из системы отсчёта, относительно которой тело движется, не является постоянной величиной, а зависит от скорости движения тела относительно этой системы отсчёта.

Пусть l_0 — длина стержня в системе отсчёта XYZ наблюдателя e , относительно которой стержень покоится. Тогда длину l этого стержня в системе отсчёта $X'Y'Z'$, относительно которой стержень движется со скоростью $\vec{v}$, можно найти по формуле

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что $l < l_0$. Формула (1) отражает так называемое *релятивистское* или *Лоренцево сокращение длины* движущегося тела.

Скорости, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, существенно меньше скорости света. Так, например, скорость движения пассажирского самолёта составляет около 800 км/ч, или 0,22 км/с. Для такой скорости отношение

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{0,22^2}{300\,000^2} = \frac{0,0484}{90\,000\,000\,000} =$$

$$= 5,4 \cdot 10^{-13} = 0,000000000000054,$$

и, следовательно, $l = l_0$. Именно поэтому в обыденной жизни Лоренцевым сокращением длины можно пренебречь.

ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ Пусть наблюдатель e' измеряет интервал времени τ_0 между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке системы $X'Y'Z'$. Например, это может быть рождение и распад элементарной частицы. Тогда интервал времени τ между этими же событиями, но измеренный наблюдателем e в системе XYZ , относительно которой система $X'Y'Z'$ движется с постоянной скоростью $\vec{v}$, равен

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что $\tau > \tau_0$. Этот эффект называют *релятивистским эффектом замедления времени* в движущихся системах отсчёта. Как и в формуле (1), при скоростях движения, намного меньших скорости света, отношением v^2/c^2 можно пренебречь.

Эффект замедления времени, в отличие от релятивистского сокращения длины, проверен экспериментально. Известно, что на высотах свыше 70 км в результате взаимодействия космического излучения с молекулами воздуха рождается большое количество нестабильных элементарных частиц. Одной из таких частиц является мюон, время жизни которого по часам, связанным с мюоном, равно $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с (собственное время жизни).

Если бы время жизни мюона не зависело от его скорости v движения относительно Земли, то за это время при условии $v \leq c$ мюон не смог бы пролететь расстояние, большее 660 м. Однако мюоны надёжно регистрируются в земных лабораториях в полном соответствии с формулой (2).



За время Δt , измеренное земным наблюдателем, корабль пролетает расстояние $2L = v\Delta t$, где v — скорость космического корабля. По диагонали свет проходит расстояние $2\sqrt{D^2 + L^2}$, откуда

$$c = \frac{2\sqrt{D^2 + L^2}}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{D^2 + v^2(\Delta t)^2/4}}{\Delta t}.$$

Возводя обе части последнего равенства в квадрат и разрешая относительно Δt , получаем

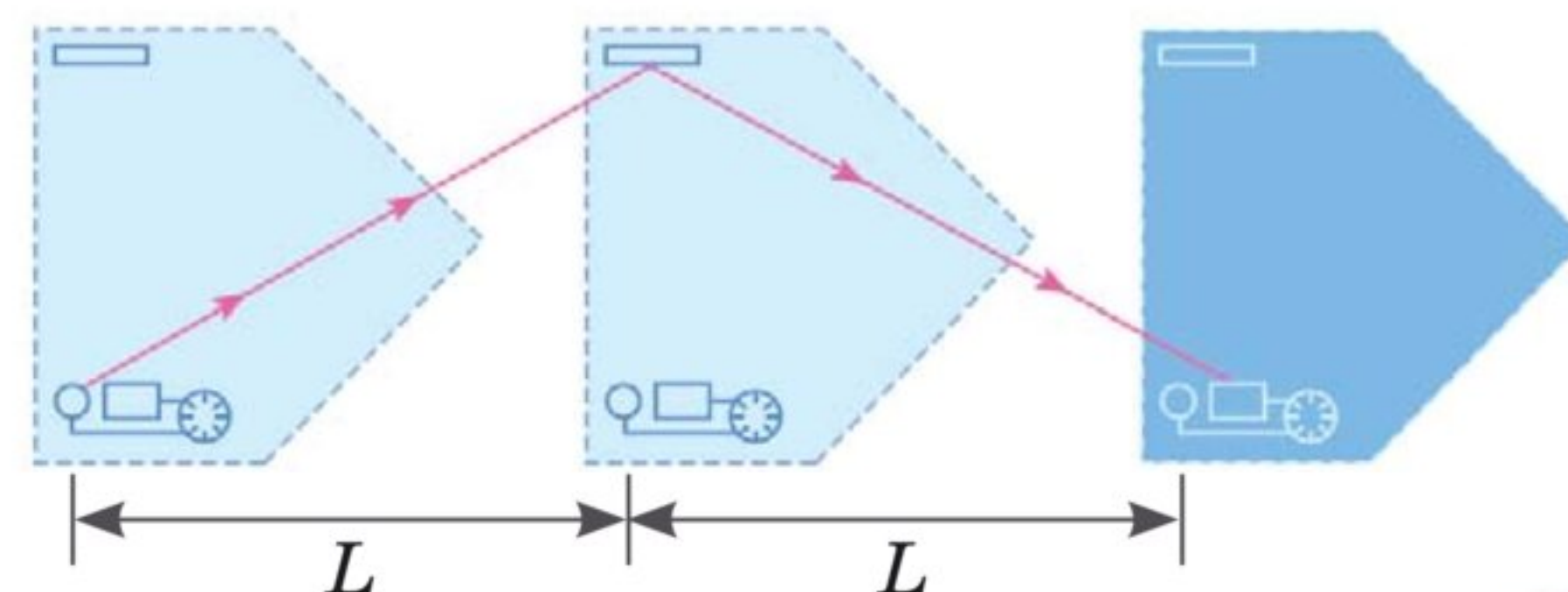
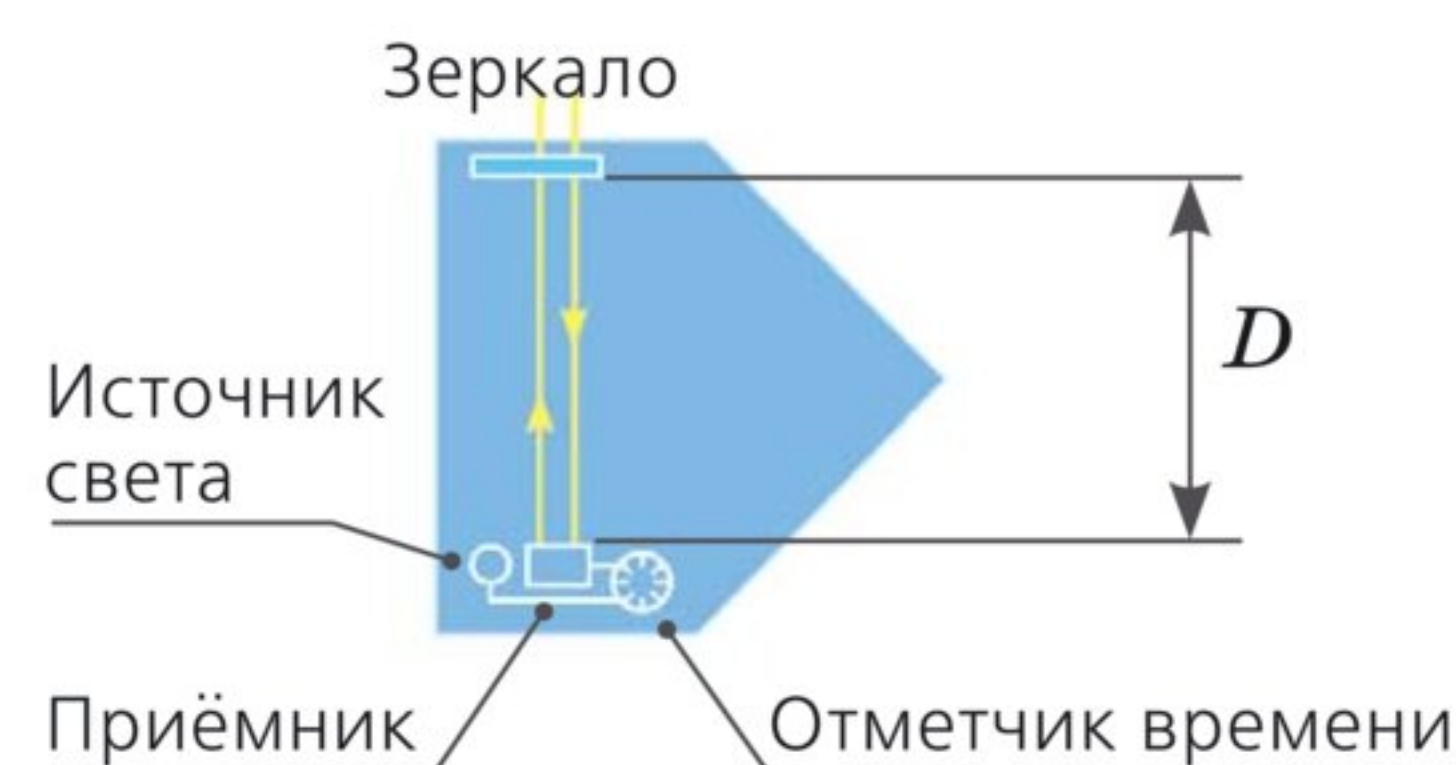
$$c^2 = \frac{4D^2}{(\Delta t)^2} + v^2, \quad \Delta t = \frac{2D}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Но $2D/c = \Delta t_0$, поэтому

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Представим себе «световые часы» очень простой конструкции. Имеется стержень длиной D . На одном конце стержня происходит вспышка света, которая отражается в зеркале, закреплённом на другом конце стержня. Наблюдатель измеряет время, за которое свет прошёл путь от одного конца стержня до зеркала и, отразившись, вернулся назад. Для наблюдателя, который покоится относительно стержня, свет проходит расстояние $2D$ со скоростью c , поэтому весь путь туда и обратно он проходит за время $\Delta t_0 = \frac{2D}{c}$.

Пусть наблюдатель, о котором мы говорим, находится на борту космического корабля, который пролетает на большой скорости относительно другого наблюдателя, находящегося на Земле. Но для земного наблюдателя свет хотя и распространяется с такой же скоростью c , но движется по другой траектории и проходит более длинный путь. Следовательно, время, измеренное наблюдателем на Земле, будет больше, чем время, измеренное наблюдателем на борту космического корабля.



ВОПРОСЫ:

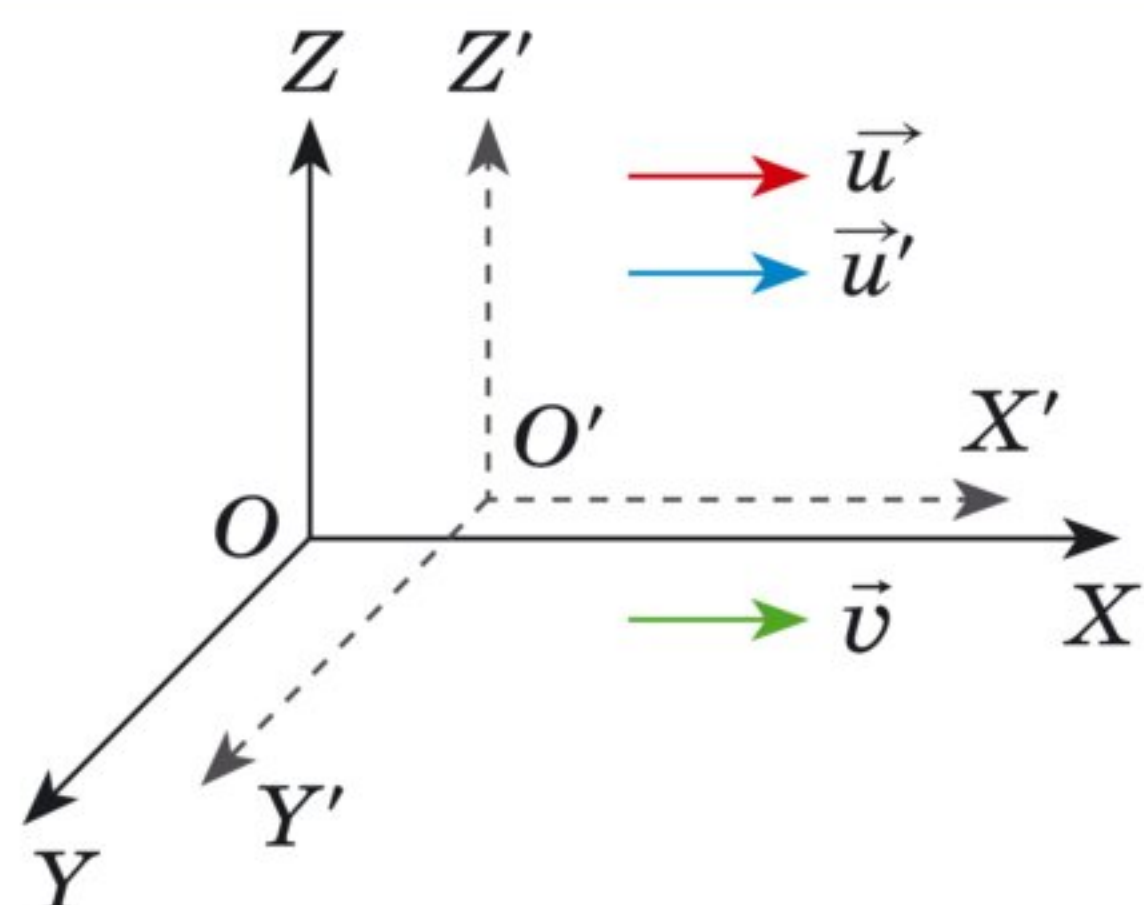
- Что такое релятивистское сокращение длины движущегося тела?
- В чём заключается релятивистский эффект замедления времени?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Что такое релятивистский закон сложения скоростей.

ВСПОМНИТЕ:

- Постулаты специальной теории относительности.
- Преобразования Лоренца.



Для скоростей, с которыми мы имеем дело в обыденной жизни, знаменатель в формулах (1) и (2) практически равен единице и формула сложения скоростей сводится к Галилеевой. Если бы мы использовали Галилеево преобразование скоростей, то мы получили бы

$$u' = (u - v).$$

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Постулаты специальной теории относительности о том, что скорость света является верхним пределом для всех возможных физических скоростей и её значение не зависит от того, движется источник света или нет, привели к коренному пересмотру классического закона сложения скоростей.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Рассмотрим опять двух наблюдателей e и e' , с каждым из которых связаны системы отсчёта XYZ и $X'Y'Z'$ соответственно. При этом система наблюдателя e' движется мимо системы наблюдателя e с постоянной скоростью $\vec{v}$.

Пусть наблюдатель e видит тело, движущееся со скоростью $\vec{u}$ вдоль оси X . Какова скорость этого тела, по мнению наблюдателя e' ? По измерениям наблюдателя e скорость $u = \Delta x / \Delta t$, а по измерениям наблюдателя e' скорость $u' = \Delta x' / \Delta t'$. Используя преобразования Лоренца, можно записать:

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2}. \quad (1)$$

Если необходимо выразить скорость u через скорости u' и v , то получим

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}. \quad (2)$$

Поставим мысленный эксперимент. Представим себе, что наблюдатель e' , находясь в ракете, летящей со скоростью $\frac{3}{4}c$, стреляет из ружья. Он видит, что пуля вылетает со скоростью $u' = \frac{1}{2}c$. Наблюдатель e , находящийся на Земле, видит, что в ракете, движущейся со скоростью $v = \frac{3}{4}c$, пуля вылетает из ружья. Если бы в этом случае скорости складывались согласно преобразованиям Галилея, для наблюдателя e скорость пули была бы больше скорости света:

$$u = \frac{3}{4}c + \frac{1}{2}c = \frac{5}{4}c.$$

А это противоречит постулатам СТО.

Воспользовавшись релятивистской формулой (2), мы можем получить скорость пули относительно наблюдателя e :

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{3}{4}c}{1 + (\frac{1}{2}c)(\frac{3}{4}c)/c^2} = \frac{\frac{5}{4}c}{1 + \frac{3}{8}} = \frac{\frac{5}{4}c}{\frac{11}{8}} = \frac{10}{11}c,$$

т. е. немного меньше c .

ВОПРОСЫ:

- Что такое релятивистский закон сложения скоростей?
- В какой ситуации релятивистский закон сложения скоростей можно заменить на преобразования скоростей Галилея?

ЧЕТЫРЁХМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО—ВРЕМЯ

«Вся суть точки зрения Эйнштейна состоит в следующем, — писал Георгий Гамов. — Если в классической физике время рассматривалось как нечто совершенно независимое от пространства и движения и считалось, что оно „по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно“ (Ньютон), то в новой физике пространство и время тесно взаимосвязаны».

ПРОСТРАНСТВО—ВРЕМЯ «Французская революция началась в Париже 14 июля 1789 года». В этом предложении установлены место и время события. Тому, кто слышит это утверждение впервые и кто не знает, что значит «Париж», можно было бы сказать: это город на нашей Земле, расположенный на 2° восточной долготы и 49° северной широты. Два числа характеризовали бы тогда место, а «14 июля 1789 года» — время, в которое произошло событие. В физике точная характеристика, когда и где произошло событие, чрезвычайно важна, гораздо важнее, чем в истории, так как эти числа образуют основу количественного описания», — писал Эйнштейн.

Вы уже знаете, что события, одновременные в одной системе отсчёта, могут быть неодновременными в другой. Вы знаете, что расстояние (длина) также не является абсолютным — его величина зависит от системы отсчёта. Для иллюстрации этого явления Гамов приводит пример с пассажиром поезда, который движется с очень большой скоростью. Если пассажир начинает свой обед в 13:00 и заканчивает его в 13:30, то по его часам он обедал 30 минут. Если же за этим пассажиром наблюдает человек, стоящий на перроне, то по его часам времени от начала и до конца обеда прошло больше (эффект замедления времени). При этом если диаметр тарелки, на которой подавался обед пассажиру поезда, составлял 25 см, то для наблюдателя на перроне эта тарелка оказывается меньшего размера (эффект сокращения длины). Можно сказать, что замедление времени и сокращение длины в некотором смысле уравнивают друг друга.

В релятивистской физике мы приходим к понятию четырёхмерного пространства—времени: три пространственных координаты (x , y , z) и время t . Мы знаем, что в отличие от преобразования Галилея в релятивистской физике пространственный интервал $\Delta x = x_2 - x_1$ и временной интервал $\Delta t = t_2 - t_1$ меняются при преобразованиях Лоренца. Однако существует величина: $s^2 = (t_2 - t_1)^2 c^2 - (x_2 - x_1)^2$, которая называется релятивистским интервалом. Она не меняется при переходе между различными инерциальными системами, т. е. остаётся инвариантной.

В общем случае, если инерциальные системы движутся произвольным образом относительно друг друга, релятивистский интервал равен: $s^2 = \Delta t^2 c^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$.

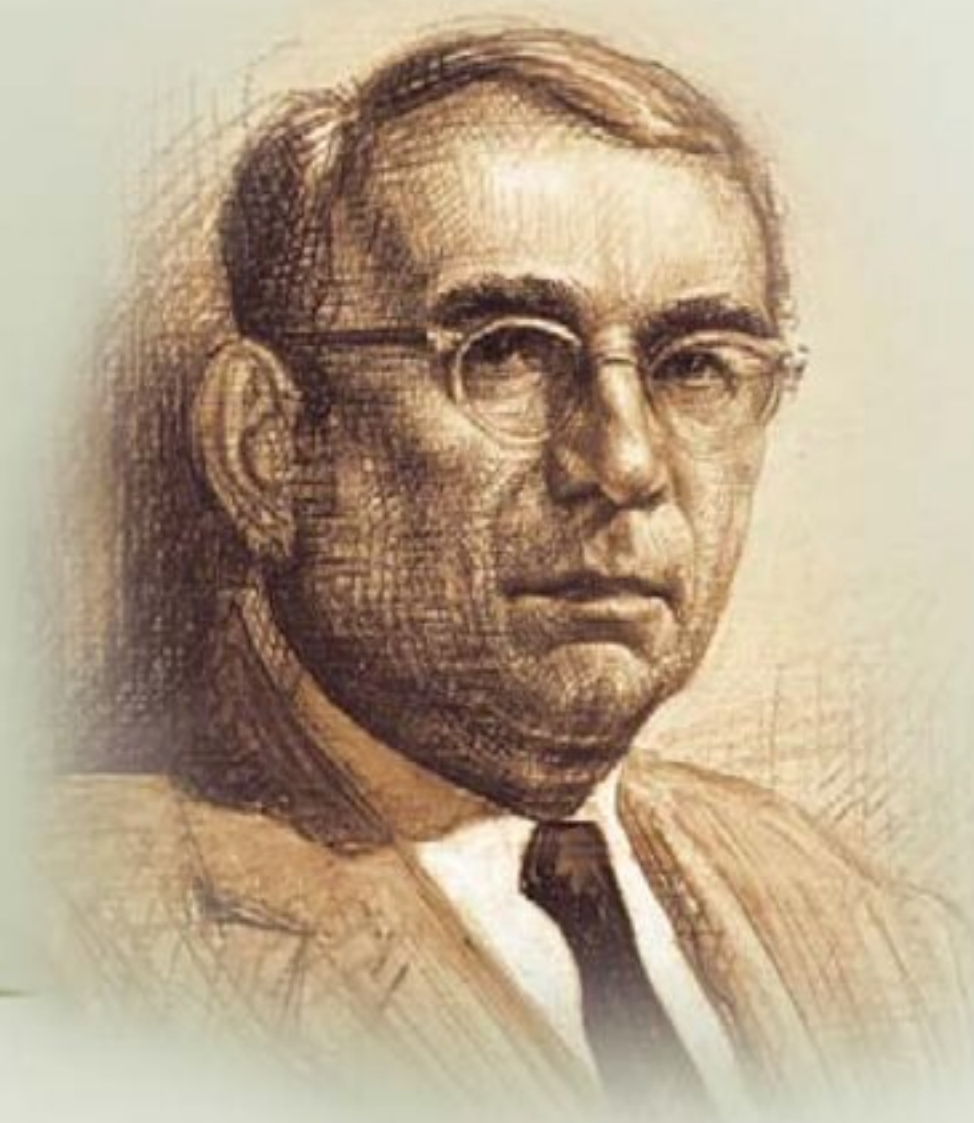
47

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Что такое четырёхмерное пространство—время.

ВСПОМНИТЕ:

- Постулаты специальной теории относительности.
- Преобразования Лоренца.



Георгий Антонович Гамов
(1904—1968)

Советский и американский физик-теоретик, астрофизик и популяризатор науки.



ВОПРОСЫ:

- Что представляет собой четырёхмерное пространство—время?
- В чём заключается основное свойство четырёхмерного пространства—времени?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Как связаны между собой масса, импульс и энергия в теории относительности.

ВСПОМНИТЕ:

● Как связаны между собой масса, импульс и энергия в классической физике?

«Формула $E = mc^2$ является, пожалуй, самой знаменитой формулой в мире... В сознании миллионов она является символом теории относительности. Многочисленные популяризаторы науки убеждают своих читателей, слушателей и зрителей в том, что в согласии с этой формулой масса любого тела возрастает с увеличением скорости. И только немногие физики, специалисты в области физики элементарных частиц, знают, что истинная формула Эйнштейна — это $E_0 = mc^2$, где E_0 — энергия, содержащаяся в покоем теле, и что масса тела не зависит от скорости, с которой оно движется, и, следовательно, не зависит от его кинетической энергии», — писал академик Лев Борисович Окунь, физик-теоретик, учёный с мировым именем, известный популяризатор физики.

$$E = mc^2$$

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МАССА, ЭНЕРГИЯ, ИМПУЛЬС

Релятивистская физика позволила взглянуть по-новому не только на пространство и время, но и на такие фундаментальные физические понятия, как энергия, масса и импульс.

МАССА, ЭНЕРГИЯ И ИМПУЛЬС В МЕХАНИКЕ НЬЮТОНА

Из классической механики о массе мы знаем следующее:

- 1) масса является мерой количества вещества, количества материи;
- 2) масса составного тела равна сумме масс составляющих его тел;
- 3) масса изолированной системы тел сохраняется, не меняется со временем;
- 4) масса тела не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой;
- 5) масса тела является мерой его инертности;
- 6) массы тел являются источником их гравитационного притяжения друг к другу.

В классической механике масса входит в основные формулы. Она связывает импульс тела p и его скорость v :

$$p = mv, \quad (1)$$

а также силу, действующую на тело, с ускорением, которое это тело приобретает в результате действия силы:

$$F = ma. \quad (2)$$

Масса входит также в формулу для кинетической энергии тела E_k :

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видна связь между массой, энергией и импульсом в классической механике.

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МАССА, ЭНЕРГИЯ И ИМПУЛЬС

И в классической, и в релятивистской физике **энергия — это самая общая мера всех процессов в природе, а импульс — это самая общая мера всех движений**. Энергия — скалярная физическая величина, а импульс — векторная. Величины энергии и импульса относительны, они зависят от системы отсчёта. Эйнштейну удалось не только связать между собой пространство и время, но и понять глубинную физическую сущность связи энергии и массы и получить релятивистские соотношения между энергией, импульсом и массой. В специальной теории относительности есть формула, которая является главной в этой науке, формула, связывающая не просто энергию с массой, а энергию, импульс и массу:

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4. \quad (4)$$

Используя преобразования Лоренца для энергии и импульса, можно показать, что при переходе от одной

инерциальной системы координат к другой соотношение $E^2 - p^2 c^2$ остаётся неизменным. Поскольку, как мы уже знаем, скорость света не изменяется при переходе от одной системы координат к другой, то масса также остаётся неизменной, т. е. она является характеристикой частицы (тела) как таковой. Представим себе, что тело массой m покоится в некоторой системе координат. В этом случае его скорость и импульс равны нулю. В этом случае тело обладает энергией, которая называется энергией покоя и обозначается E_0 . Из формулы (4) следует, что

$$E_0 = mc^2. \quad (5)$$

Открытие того, что покоящееся тело обладает огромной энергией, было великим открытием Эйнштейна, кардинально изменившим представления об окружающем мире.

Пусть теперь масса тела равна нулю. Есть ли в природе такие тела? Да, например, фотон — квант света является безмассовой частицей, т. е. масса фотона равна нулю. При этом фотоны движутся со скоростью света. В этом случае из формулы (4) следует, что

$$E = pc. \quad (6)$$

Таким образом, хотя фотон и не обладает массой, он обладает энергией и импульсом. Эксперименты выдающегося физика-экспериментатора П. Н. Лебедева по измерению давления света подтвердили наличие импульса у фотонов.

В общем случае в теории относительности импульс частицы связан с её скоростью соотношением

$$p = \frac{E}{c^2} v. \quad (7)$$

Связь полной энергии E с массой m и скоростью v даётся соотношением

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (8)$$

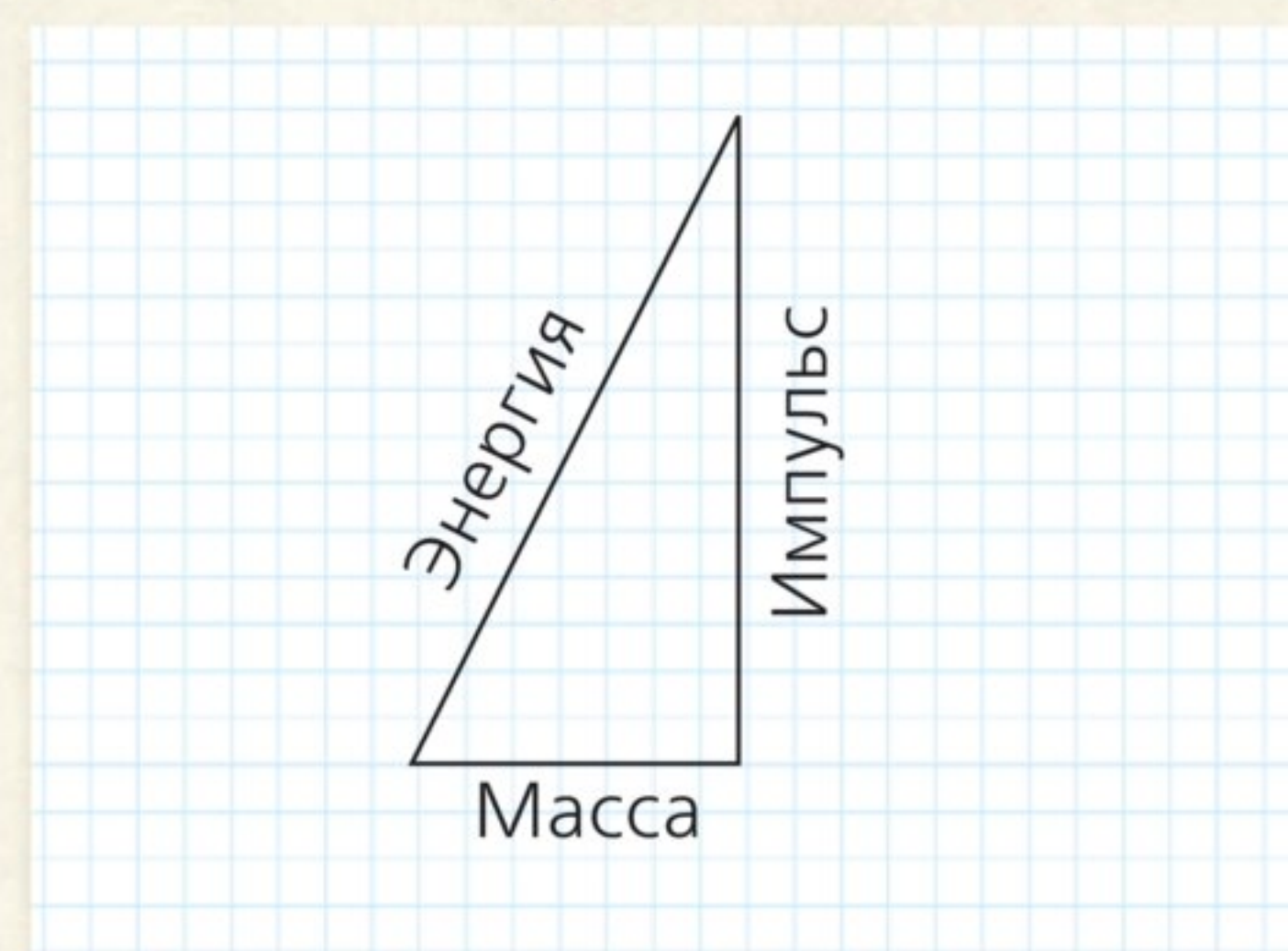
Отметим, что в релятивистской физике **мерой инертности тела** при произвольной скорости $v \leq c$ является его **полная энергия E** , а не его масса m .

Как и в ньютоновой механике, в теории относительности имеют место законы сохранения энергии и импульса изолированной частицы или изолированной системы частиц. Энергия и импульс сохраняются и в различных реакциях, например в столкновениях частиц на коллайдерах. Но, в отличие от механики Ньютона, в теории относительности масса системы взаимодействующих частиц не равна сумме их масс.

Например, в реакции аннигиляции электрона и позитрона вся масса переходит в энергию образовавшихся гамма-квантов. А в реакции деления ядер масса осколков деления не равна массе исходного ядра.

Схематически связь между массой, энергией и импульсом можно изобразить в виде прямоугольного треугольника, где гипотенузой является энергия частицы, а катетами — произведение импульса на скорость света и произведение массы на квадрат скорости света. Все эти «стороны треугольника» имеют размерности энергии. По теореме Пифагора:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4.$$



Законы теории относительности не отменяют законы классической физики: при скоростях, существенно меньших скорости света, отношение v/c стремится к нулю, и все формулы релятивистской физики переходят в хорошо знакомые вам формулы механики Ньютона. Таким образом, классическая механика является частным случаем релятивистской механики при скоростях, много меньших скорости света.

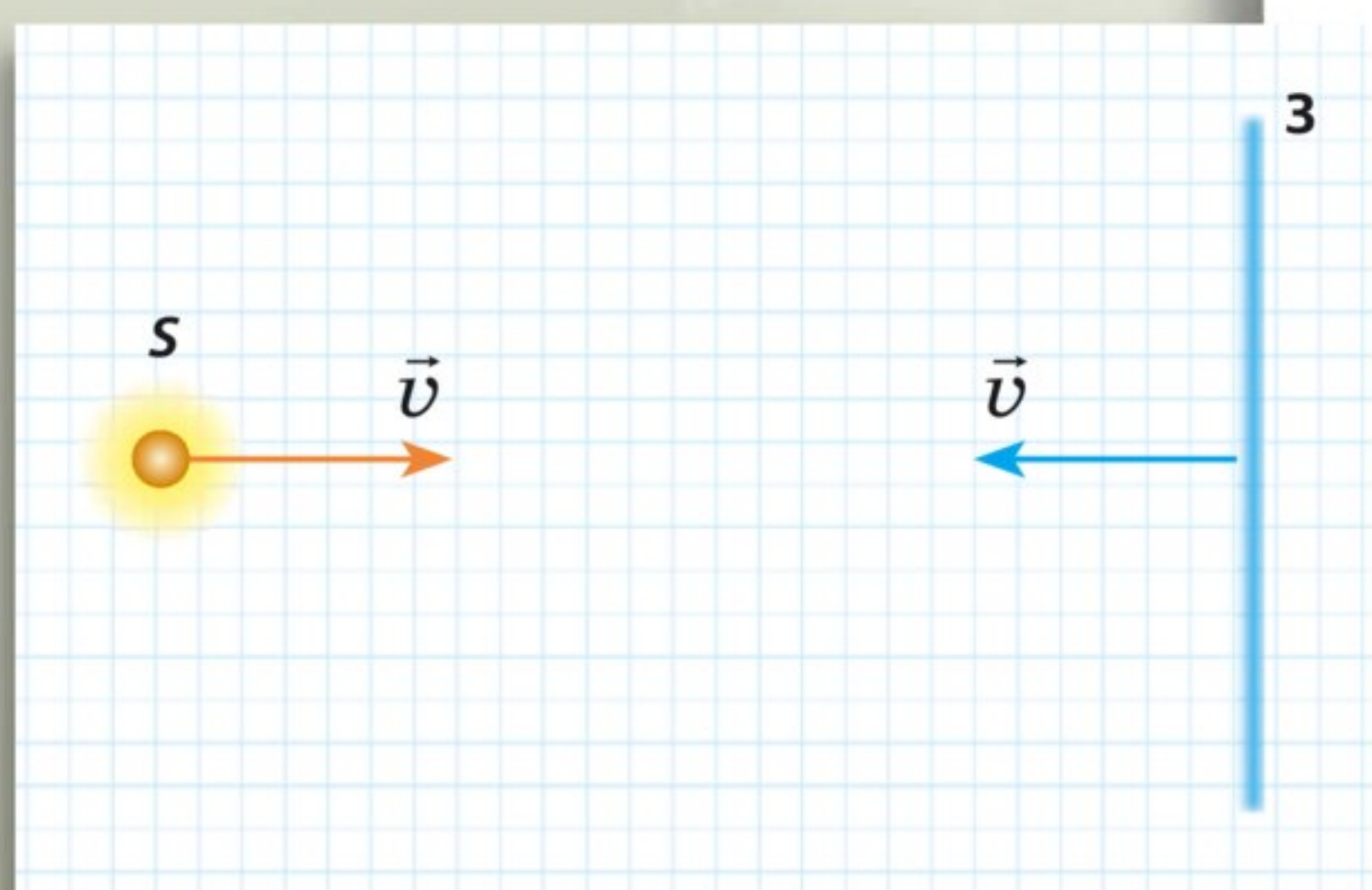
ЗАДАНИЯ:

- Как связаны между собой масса, энергия и импульс в классической механике?
- Как связаны между собой масса, энергия и импульс в релятивистской механике?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на постулаты специальной теории относительности.
- Как решать задачи на вычисление энергии покоя.



ЗАДАЧА 1 Как известно, в инерциальной системе отсчёта свет от неподвижного источника распространяется в вакууме со скоростью c . Чему будет равна скорость отражённого от зеркала света в инерциальной системе отсчёта, связанной с источником, если источник света S и зеркало Z движутся навстречу друг другу со скоростями, равными по модулю v ?

Решение:

Согласно одному из постулатов специальной теории относительности скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчёта и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника светового сигнала. В данной задаче роль приёмника светового сигнала играет зеркало, следовательно, скорость отражённого от зеркала света будет равна скорости света в вакууме, т. е. c .

Ответ: скорость отражённого от зеркала света равна скорости света в вакууме, т. е. c .

ЗАДАЧА 2 Вычислите энергию, соответствующую массе покоящегося электрона.

Дано:
 $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

 $E_0 = ?$

Решение:
 Согласно формуле Эйнштейна
 $E_0 = mc^2$.
 Подставим числовые значения и получим

$$E_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

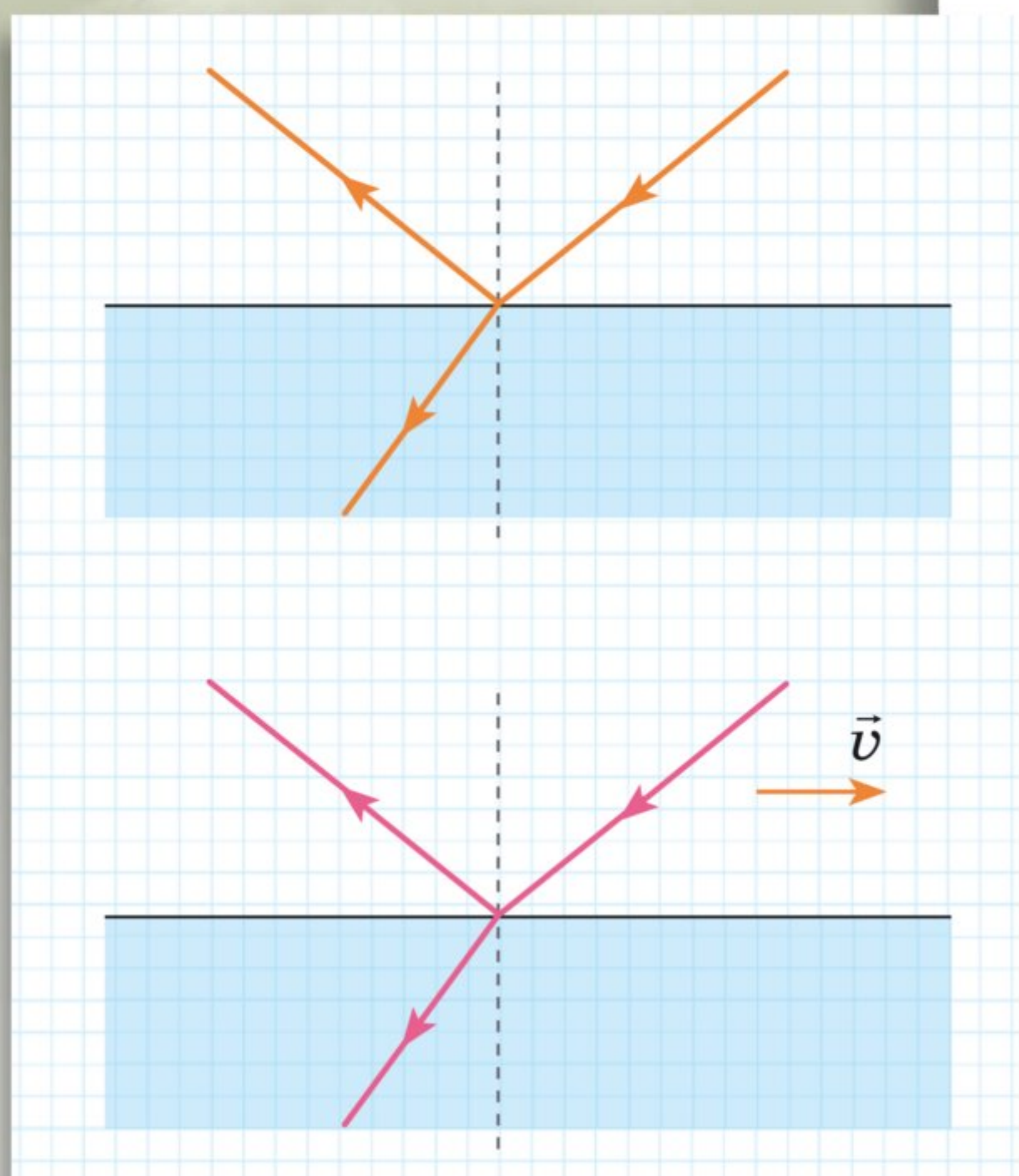
Ответ: $E_0 = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 3 С помощью очень точных измерительных приборов проверяется выполнение законов геометрической оптики в двух космических кораблях: один из них покоится относительно некоторой инерциальной системы отсчёта, а другой движется прямолинейно со скоростью $v = c/2$, где c — скорость света в вакууме. Может ли быть обнаружено различие в результатах опытов в каждом из двух случаев?

Решение:

Никакого различия в смысле выполнения законов геометрической оптики наблюдаться не может. В соответствии с принципом относительности все физические явления, протекающие на движущемся космическом корабле, никак не зависят от скорости его равномерного и прямолинейного движения.

Ответ: нет.



ЗАДАЧА 4 Определите относительную скорость движения ракеты, если её продольные размеры земному наблюдателю кажутся в 3 раза меньше «истинных».

Дано:
 $l_0 = 3l$

$v = ?$

Решение:

В системе отсчёта $X_1Y_1Z_1$, относительно которой ракета покоится, длина ракеты равна l_0 . В системе отсчёта XYZ , связанной с земным наблюдателем, относительно которой ракета движется со скоростью v , длина ракеты равна l . Эти длины связаны соотношением

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Так как $l_0 = 3l$, $l = 3l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$;

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{9};$$

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{9}} \approx 0,94c = 0,94 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v = 2,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

ЗАДАЧА 5 Космический корабль движется со скоростью $0,8c$ относительно Земли. Определите, сколько времени прошло на Земле, если по корабельным часам прошло 10 лет.

Дано:
 $v = 0,8c$
 $t_0 = 10 \text{ лет}$

$t = ?$

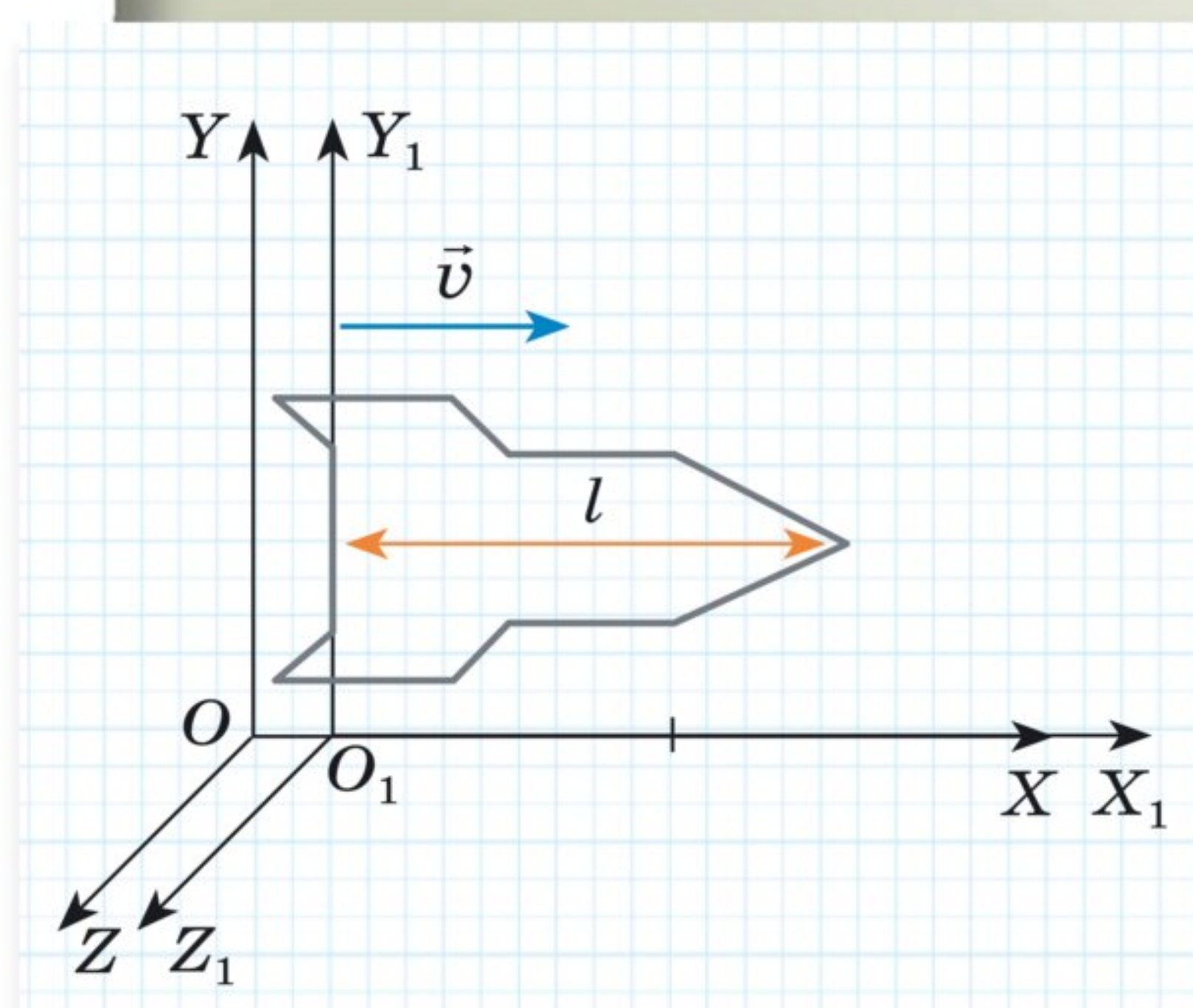
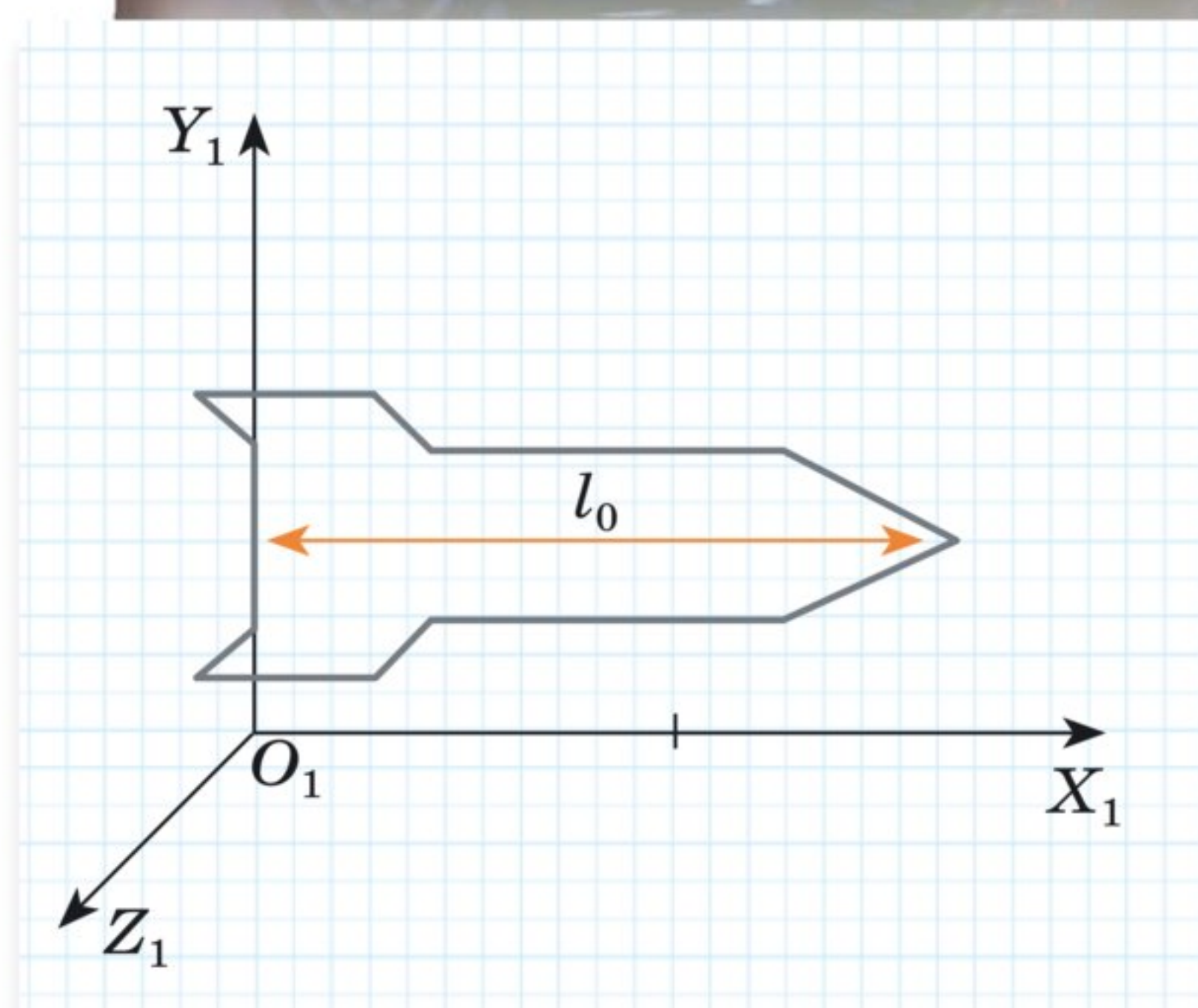
Решение:

Время, измеренное в системе отсчёта $X_1Y_1Z_1$, относительно которой космический корабль покоится, равно t_0 (см. рисунок предыдущей задачи). Время, измеренное наблюдателем с Земли, в системе отсчёта XYZ , относительно которой космический корабль движется со скоростью v , равно t . Эти времена связаны соотношением

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{t_0}{0,6}.$$

$$t = \frac{10 \text{ лет}}{0,6} \approx 16,7 \text{ лет}.$$

Ответ: $t = 16,7 \text{ лет}$.



ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ ОДИНАКОВЫ
ВО ВСЕХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ ОТСЧЁТА

ОДНОВРЕМЕННОСТЬ
ОТНОСИТЕЛЬНА

СКОРОСТЬ СВЕТА В ВАКУУМЕ
 $c = 300\,000$ км/с

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

● В основе специальной теории относительности лежат два постулата:

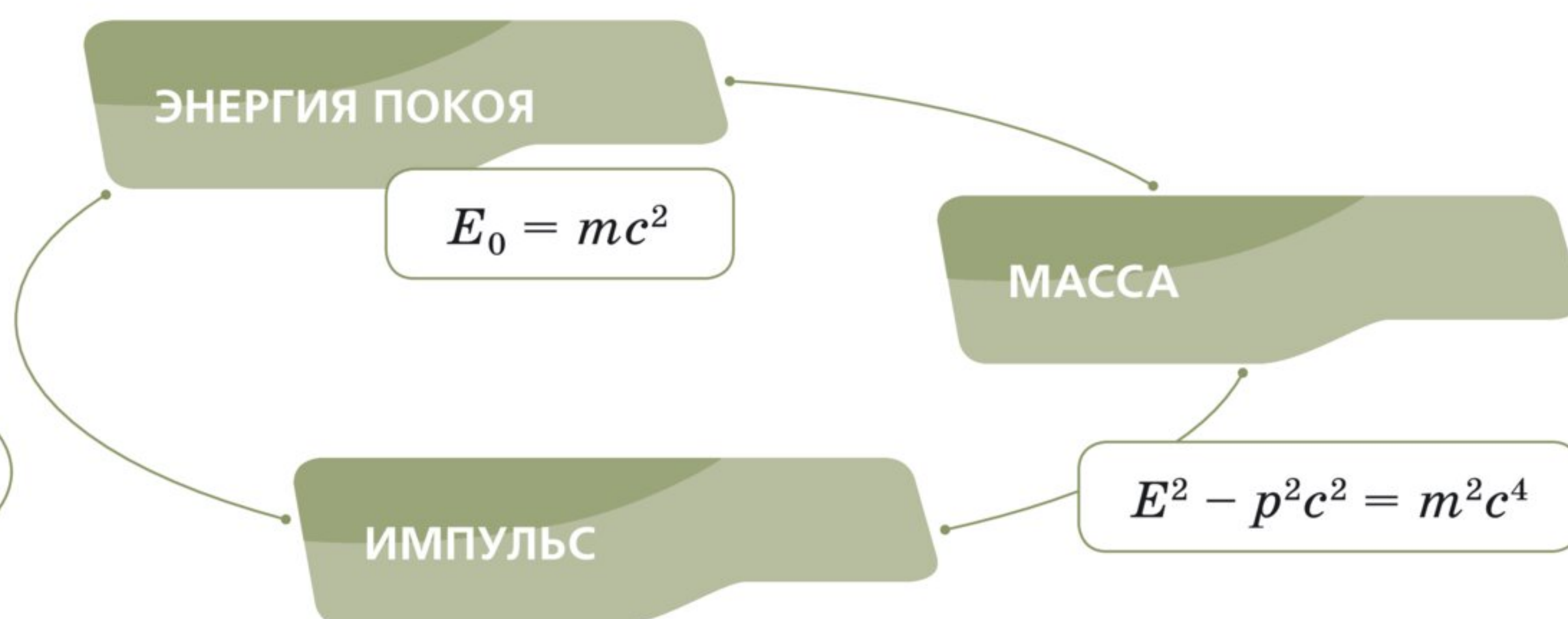
1. Законы природы одинаковы во всех системах отсчёта, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приёмника светового сигнала.

● Согласно теории относительности одновременность — понятие не абсолютное, а относительное.

● При скоростях, сравнимых со скоростью света, происходит сокращение длины и замедление времени.

● Классическая механика является частным случаем релятивистской механики при скоростях, много меньших скорости света.



ПОДРОБНЕЕ...

Филонович С.Р. Самая большая скорость. Вып. 27. / С. Р. Филонович. — М.: Наука, 1983. — (Библиотечка «Квант»).

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Будут ли выполняться закон всемирного тяготения и закон Кулона для заряженных тел, движущихся друг относительно друга с релятивистскими скоростями?

● Далёкая галактика удаляется от Земли со скоростью, равной половине скорости света. Наблюдатель на Земле регистрирует испущенный галактикой свет. Чему равна скорость этого света относительно наблюдателя?

● В некоторой системе отсчёта две релятивистские частицы движутся в противоположных направлениях. Может ли скорость их «разбегания» превышать скорость света?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Вся физика. Физический
энциклопедический словарь
<http://gotourl.ru/13730>



ФИЗИКА МИКРОКОСМОСА



Конец XIX — начало XX в. ознаменовались чередой великих открытий в области физики, не только кардинально изменивших сложившуюся к этому времени картину мира, но и послуживших толчком для необычайно быстрого прогресса в технике и технологиях. К таким открытиям можно отнести: открытие рентгеновского излучения (1895); открытие Томпсоном электрона (1897); открытие Беккерелем явления радиоактивности (1896); гипотезу Планка о квантовой природе света (1900); открытие Резерфордом атомного ядра (1911); квантовую модель атома Бора (1913).

Эти открытия позволили физикам понять структуру атома. Стало абсолютно ясно, что законы классической физики неприменимы для объектов микромира, которые подчиняются другим законам — законам квантовой механики. Эти законы были разработаны блестящей плеядой физиков, среди которых были Гейзенберг, Шрёдингер, Паули, Дирак, Ландау, Фок и др.

Э. Резерфордом в 1919 г. была осуществлена первая ядерная реакция, в которой он бомбардировал атомы азота α -частицами и в результате получил атомы кислорода и водорода.

А. Эйнштейн в 1905 г. создал специальную теорию относительности, а в 1915 г. — общую теорию относительности и написал свою знаменитую формулу, связавшую массу и энергию. В 1939 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом было открыто деление ядер урана, а в 1940 г. советскими физиками Г. Н. Флёровым и К. А. Петряком было открыто спонтанное деление урана. Стало ясно, что понимание законов квантовой механики и связи массы и энергии даёт человечеству возможность доступа к огромным запасам энергии, скрытым внутри атомных ядер. Формула Эйнштейна $E = mc^2$ стала символом XX в.

Вместе с тем впервые человечество столкнулось с огромной проблемой, когда результаты научных исследований стали не только источником знаний об окружающем нас мире, но и огромной опасностью, связанной с использованием этих знаний для производства оружия массового поражения страшной разрушительной силы. Фактически применение такого оружия ставит под угрозу жизнь на Земле и само существование человечества.

Несмотря на то что квантовая механика — это сложный раздел физики, объясняющий физические процессы внутри атома (расстояния порядка 10^{-10} м), трудно сейчас найти какую-нибудь область нашей жизни, где не применялись бы достижения этого раздела физики. Мобильные телефоны, планшетные компьютеры, телевизоры с жидкокристаллическим экраном, лазерные диски, современная электроника на основе интегральных микросхем, применение в медицине лазеров, томографов, радиоизотопов — всё это примеры использования квантовой механики в технических устройствах.



Вспомним, что слово «атом» в переводе с древнегреческого означает «неделимый». Но учёные «разделили» атом. Сегодня мы знаем, что атом состоит из атомного ядра и электронов, а само ядро — из протонов и нейтронов. Если размеры атома составляют величины порядка 10^{-10} м, то размеры протонов и нейтронов — это величины порядка 10^{-15} м. Возникает вопрос: протоны и нейтроны — это действительно элементарные, т. е. неделимые, частицы? Или они сами состоят из каких-то других, более мелких «кирпичиков» материи? Есть ли ещё какие-то частицы, кроме электронов, протонов, нейтронов и квантов света — фотонов?

Учёные для ответа на эти вопросы исследовали приходящие на Землю космические лучи и начали строить ускорители для получения частиц и ядер высоких энергий. В результате за вторую половину XX в. было открыто несколько сотен различных частиц, которые первоначально назывались элементарными. Но, как оказалось, есть ещё «более элементарные кирпичики» материи. Это 6 различных кварков и 6 соответствующих им антикварков.

Кварки, наверное, одни из самых загадочных объектов природы. Они имеют дробный электрический заряд ($2/3$ и $-1/3$ элементарного электрического заряда). Вместе с электрическим они обладают ещё одним новым качеством, которое физики называют цветовым зарядом. В природе объекты, которые состоят из кварков, всегда имеют целый или нулевой электрический заряд. При сильных взаимодействиях кварки постоянно обмениваются частицами, которые называют глюонами. Глюоны, как и кварки, обладают цветовым зарядом. Именно глюоны связывают кварки между собой.

Модель, по которой элементарные частицы, в том числе протон и нейтрон, состоят из кварков, была предложена в 60-е годы прошлого века. Никто и никогда не видел кварки. Сначала считалось, что кварки — это удобная математическая модель, систематизирующая «зоопарк» сотен элементарных частиц, но уже в конце 1960-х гг. в экспериментах по рассеянию электронов высоких энергий на протонах существование кварков было доказано экспериментально.

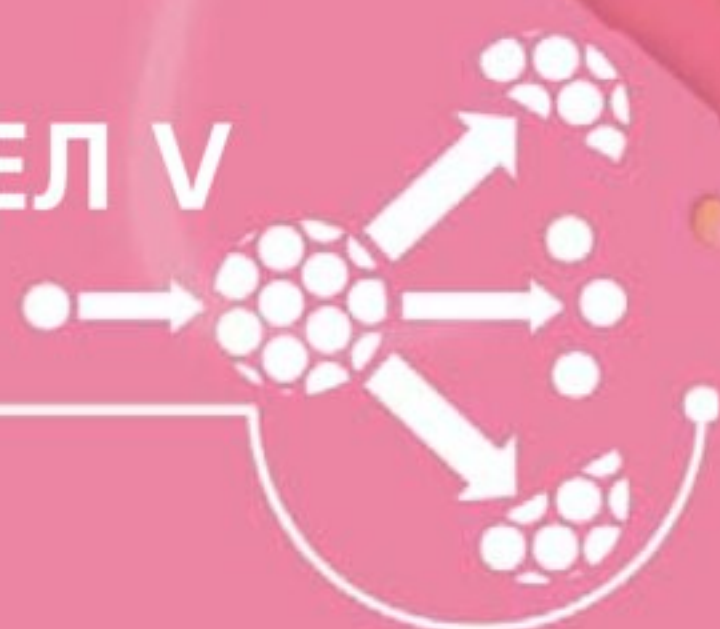
Сегодня известно, что в природе существует четыре типа взаимодействий, которые называют фундаментальными: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. В микромире из них существенную роль играют три последних. Кварки участвуют в электромагнитных, сильных и слабых взаимодействиях. Каждое из взаимодействий характеризуется своим переносчиком. Переносчики носят название фундаментальных бозонов. Пока вы знакомы только с двумя фундаментальными бозонами — фотоном (переносчиком электромагнитных взаимодействий) и глюонами (переносчиками сильных взаимодействий). Есть ещё один тип действительно элементарных частиц — лептоны. Это известный вам электрон, а также загадочные частицы — нейтрино, которые возникают при слабых взаимодействиях. У них очень маленькая масса, и они могут проходить огромные расстояния во Вселенной. Эти представления о структуре материи называются Стандартной моделью.

Глава 9

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. АТОМНАЯ ФИЗИКА

- ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА
- КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА
- ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА
- МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА
- АТОМ БОРА
- АТОМ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
- ЛАЗЕР
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ V



**КВАНТОВАЯ
ФИЗИКА**

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Каждый физик думает, что он знает, что такое фотон. Я потратил всю жизнь, чтобы узнать, что такое фотон, и до сих пор этого не знаю.

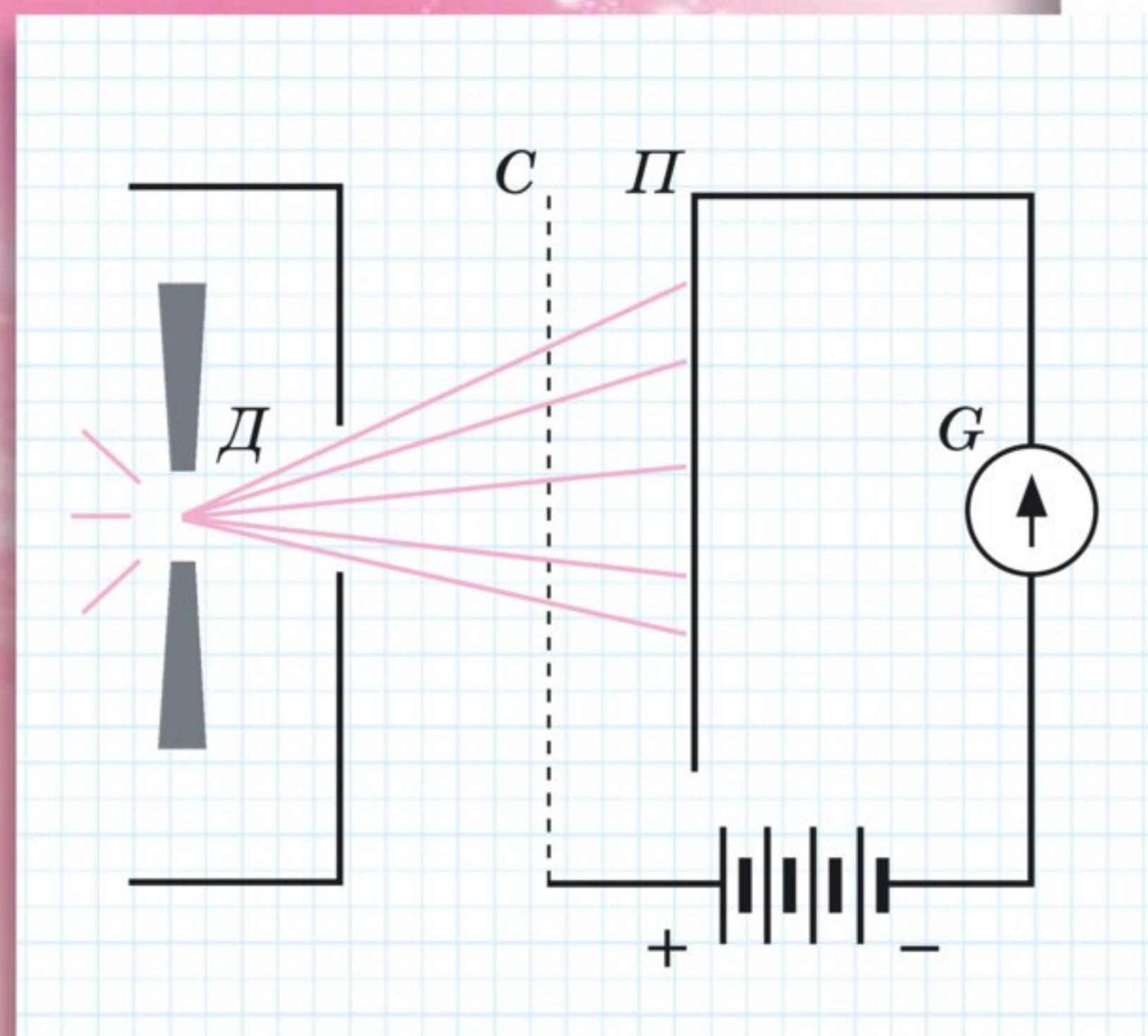
А. Эйнштейн

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое фотоэффект и кто открыл это явление.
- Какие заряженные частицы вырываются с поверхности металла при его освещении светом определённой частоты.
- Что такое ток насыщения и от чего он зависит.
- В чём заключаются основные законы фотоэффекта.
- Что такое красная граница фотоэффекта.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое световые волны?
- Какие существуют виды излучений?
- Что такое частота излучения и как она связана с длиной волны?



ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА

Опыты по воздействию ультрафиолетового излучения на некоторые металлы сыграли важную роль в развитии наших представлений о природе света.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В 1887 г. Г. Герц обратил внимание на то, что возникновение искры между цинковыми шариками разрядника происходит при меньшей разности потенциалов, если на один из электродов направить ультрафиолетовое излучение. Для самого Герца это явление так и осталось загадочным.

В 1888—1889 гг. тщательные исследования воздействия света на цинковые электроды были осуществлены российским физиком А. Г. Столетовым. В своих опытах Столетов использовал электрическую цепь, состоящую из источника и конденсатора, положительной обкладкой которого являлась медная сетка *С*, а отрицательной — цинковая пластина *П*. При этом для регистрации протекшего заряда в цепь пластины *П* был включён гальванометр *G*. Обращённая к сетке поверхность пластины *П* освещалась светом электрической дуги *Д*, излучение которой характеризуется большим количеством ультрафиолетовых лучей.

До тех пор пока внутренняя поверхность конденсатора не освещалась, ток в цепи отсутствовал. При освещении цинковой пластины ультрафиолетовыми лучами гальванометр фиксировал наличие тока в цепи.

Когда А. Г. Столетов менял полярность подключения конденсатора к источнику, т. е. когда катодом становилась сетка, а анодом — цинковая пластина, то даже при наличии большой разности потенциалов между электродами ток в цепи отсутствовал.

Единственно разумным объяснением результатов этих опытов может быть только факт вырывания отрицательно заряженных частиц с поверхности цинковой пластины. Если она заряжена отрицательно, то частицы от неё отталкиваются, и ток в цепи есть. В случае же положительного заряда пластины вырванные светом частицы притягиваются к ней, и тока в цепи не будет.

Предпринятые в дальнейшем измерения отношения заряда частиц к их массе показали, что эти частицы являются электронами. Поэтому вырванные таким образом электроны называют *фотоэлектронами*, а само явление — **фотоэлектрическим эффектом** или просто **фотоэффектом**.

Как показали многочисленные опыты, фотоэффект вызывают именно ультрафиолетовые лучи, входящие в состав излучения электрической дуги. Действительно, когда перед цинковой пластиной помещалось обыкновенное стекло, которое поглощает ультрафиолетовые лучи, то фотоэффект прекращался.

А. Г. Столетов исследовал также катоды из различных металлов и использовал при этом монохроматический свет разной частоты.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА Для изучения закономерностей фотоэффекта можно использовать установку, состоящую из вакуумированного стеклянного баллона, содержащего два электрода: анод A и катод K . Внутри баллона на катод через кварцевое стекло, которое не поглощает ультрафиолетовое излучение, направляется пучок света. Напряжение между электродами регулируется с помощью потенциометра.

Под действием света с поверхности катода вырываются электроны, которые ускоряются в электрическом поле и образуют ток во внешней цепи.

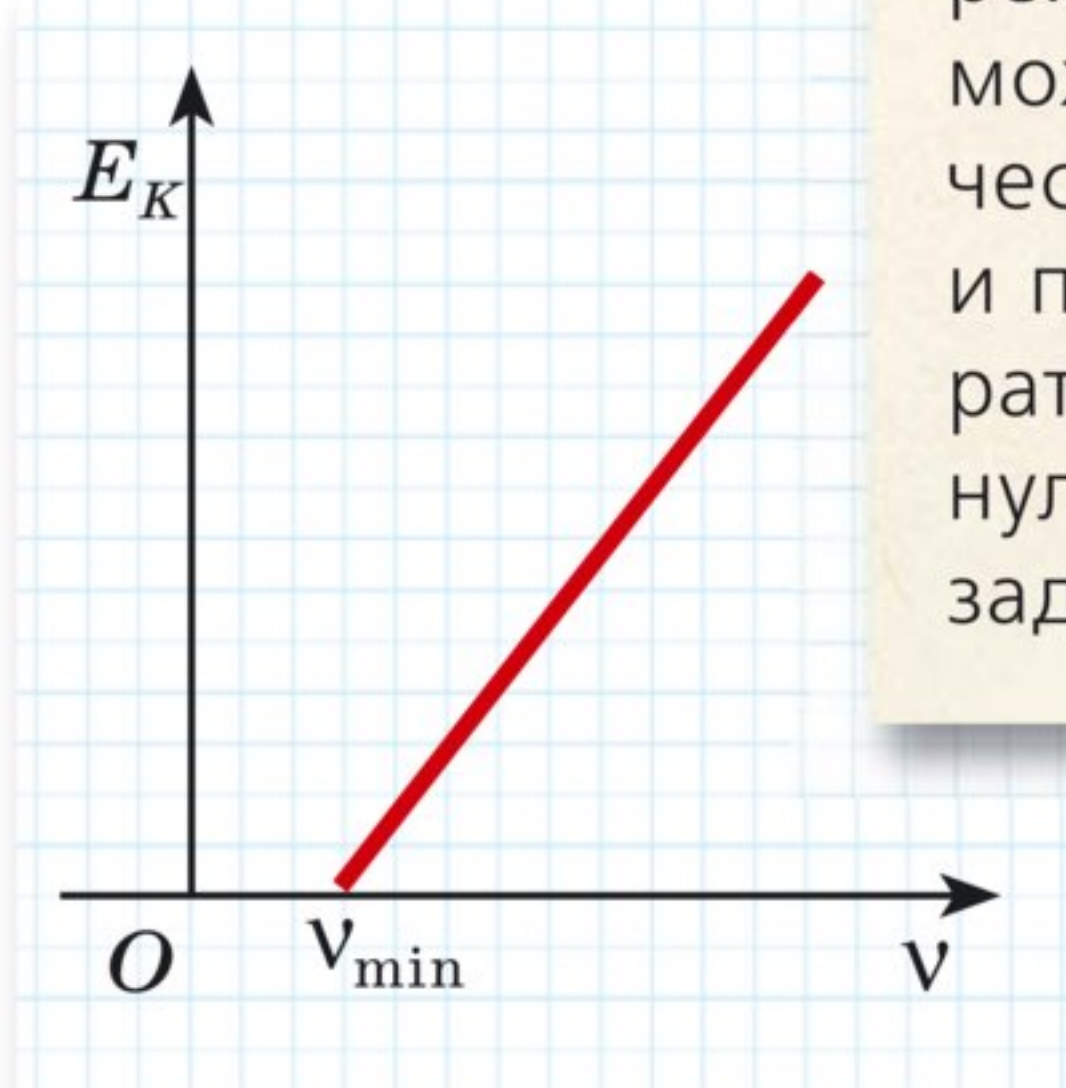
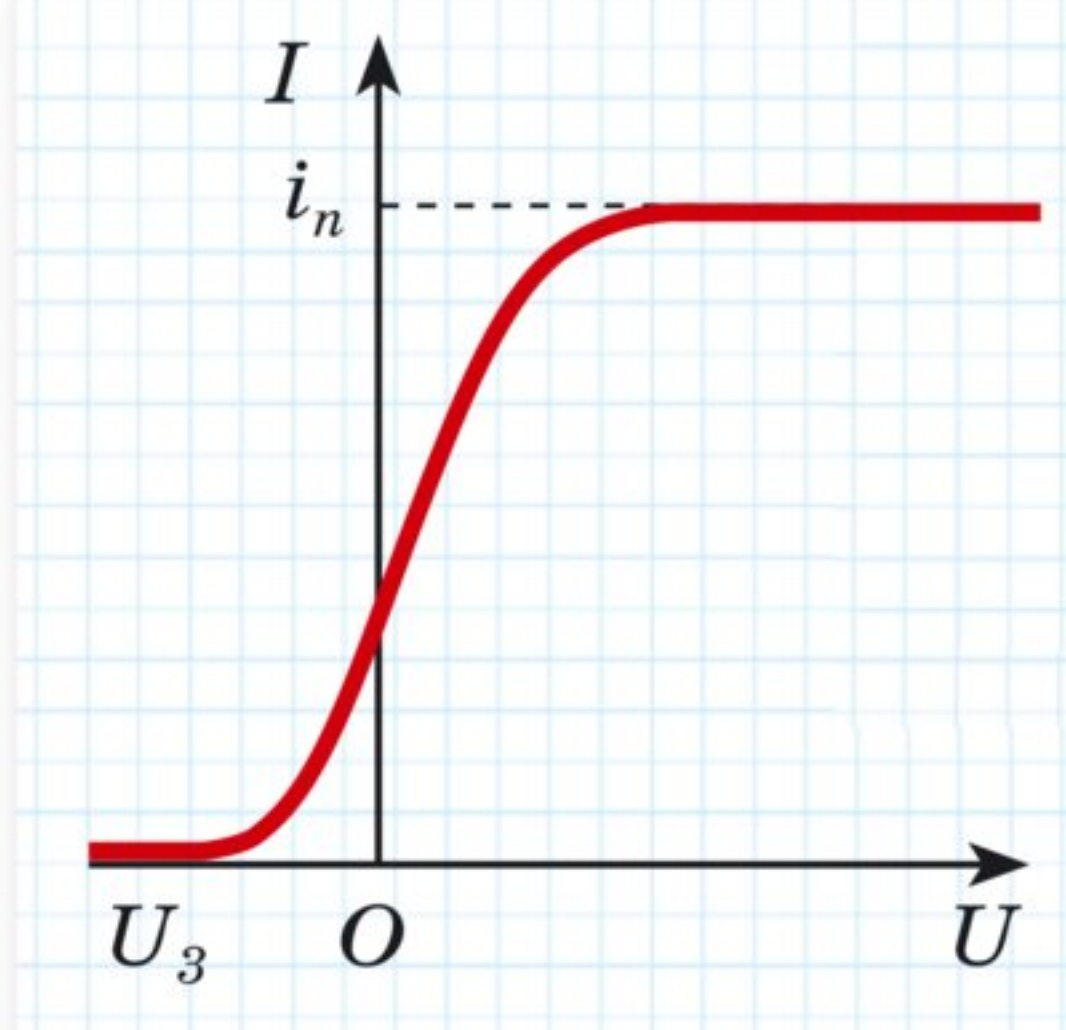
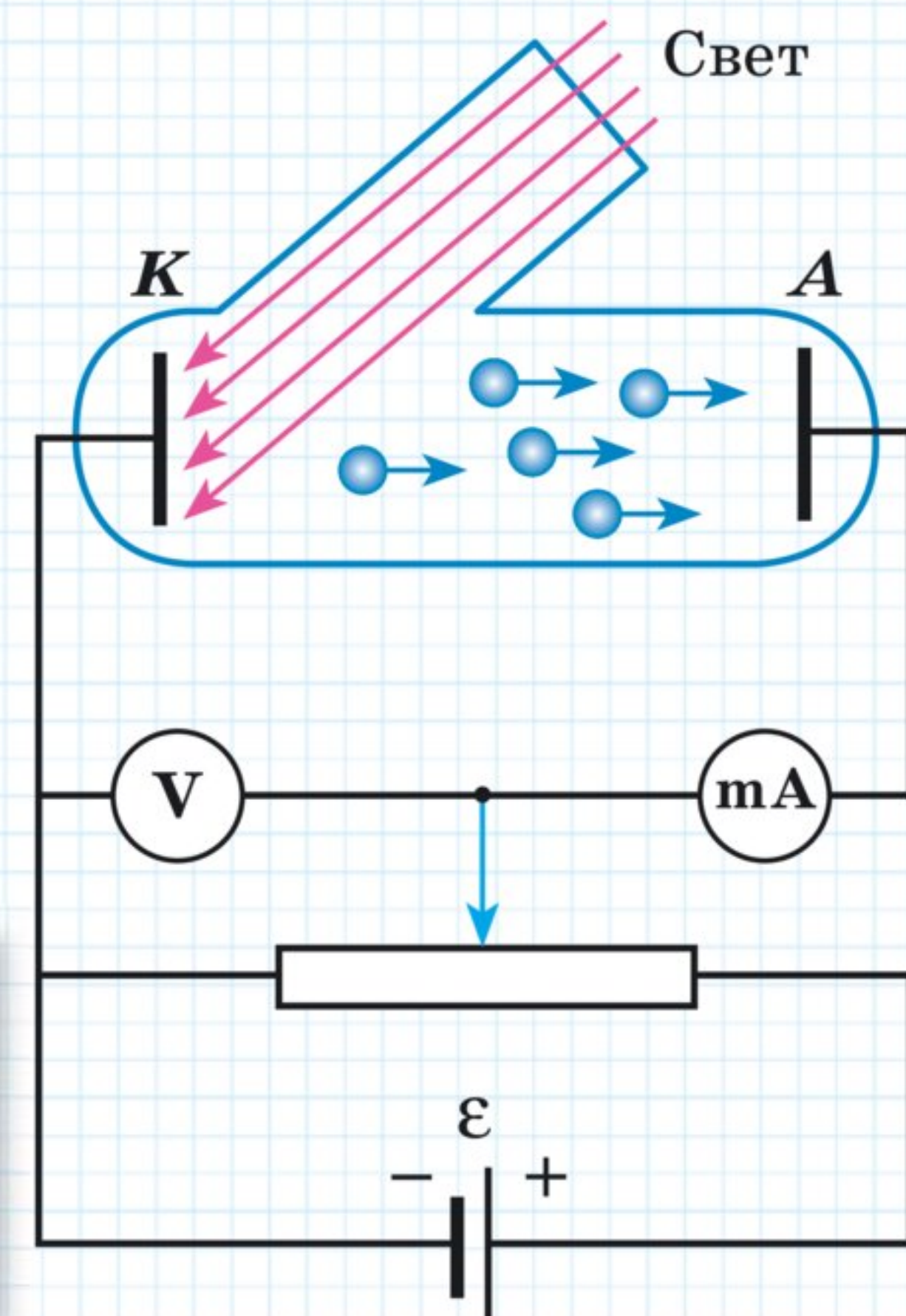
Как показывает опыт, если увеличивать напряжение между электродами, не меняя при этом интенсивности света, то сила тока в цепи возрастает. Однако при некотором напряжении ток достигает своего максимального значения и далее остаётся неизменным. Это значение тока называется *током насыщения*. Ток насыщения I_n при неизменном световом потоке не зависит от напряжения и определяется числом электронов, испускаемых катодом за 1 с.

Опытным путём А. Г. Столетов установил, что **количество электронов, вырванных излучением с поверхности катода за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.**

Как показали последующие измерения, **максимальная кинетическая энергия E_k вырванных электронов линейно возрастает при увеличении частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.**

Эксперименты позволили также установить ещё одну важную закономерность: для каждого вещества существует такая наименьшая частота $\nu_{\min}$, при которой ещё возможен фотоэффект. При частотах излучения, меньших $\nu_{\min}$, фотоэффект не наблюдается ни при каком значении интенсивности света. Это граничное значение частоты получило название **красной границы фотоэффекта**. Это название обусловлено тем, что ограничение со стороны частот $\nu < \nu_{\min}$ означает также ограничение со стороны больших длин волн $\lambda > \lambda_{\max}$. А большие длины волн соответствуют красной части спектра.

Отметим, что наличие красной границы не означает её принадлежность именно к красному цвету. Для цинка, например, красная граница лежит в ультрафиолетовой области, для калия — в жёлтой части спектра, а для цезия — в оранжевой.



Как показали опыты, сила фототока отлична от нуля при отсутствии напряжения между электродами. Если изменить полярность батареи, то сила тока вследствие торможения электронов в электрическом поле будет уменьшаться и при некотором напряжении обратной полярности станет равной нулю. Это напряжение называется задерживающим напряжением.

ВОПРОСЫ:

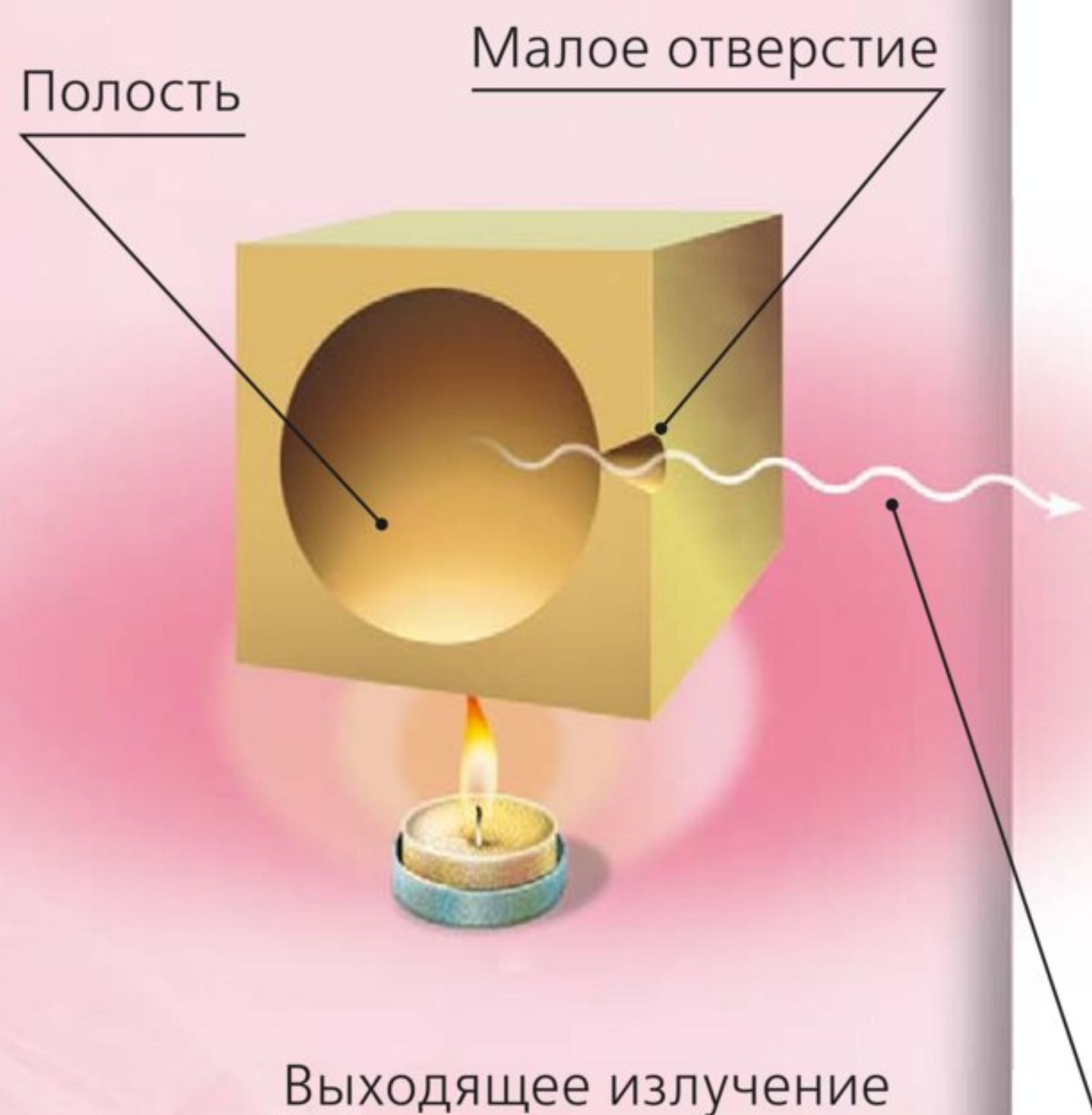
- Почему входное окошко в установке для изучения фотоэффекта закрывают кварцевым стеклом?
- Известно, что интенсивность света, падающего на фотокатод, возросла. Какие физические характеристики фотоэффекта изменились и в какую сторону?
- От чего зависит фототок насыщения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое абсолютно чёрное тело.
- Каковы особенности излучения абсолютно чёрного тела.
- В чём заключается суть квантовой гипотезы Планка.
- Как записывается уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое фотоэффект?
- Каковы законы фотоэффекта?
- Что такое красная граница фотоэффекта?



Макс Планк
(1858—1947)

Выдающийся немецкий физик, один из основоположников квантовой теории.

КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Все попытки объяснить закономерности фотоэффекта на основе волновой природы света потерпели неудачу. Поэтому потребовались совершенно иные соображения о механизме излучения и поглощения света, основанные на квантовых представлениях.

ИЗЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА И ФОТОЭФФЕКТ

Трудности, возникшие при описании теплового излучения тел и явлений фотоэффекта, явились серьёзным вызовом классической теории электромагнетизма.

Как показали опыты, спектр излучения тел, нагретых до одной и той же температуры, различен для разных веществ. Но если внутри образца сделать полость и соединить её с внешним пространством при помощи узкого отверстия, то спектральный состав излучения из этого отверстия уже не будет зависеть от типа вещества.

Это излучение получило название **излучения абсолютно чёрного тела**, поскольку для наблюдателя оно исходит из чёрного отверстия. И хотя на самом деле абсолютно чёрных тел не существует, по своим оптическим свойствам к ним близки сажа, чёрный бархат, чёрная бумага и т. п. Эти тела действительно являются наиболее интенсивными источниками теплового излучения.

В конце XIX в. зависимость интенсивности I_λ излучения абсолютно чёрного тела от длины волны была тщательно изучена экспериментально. Характерной особенностью этой зависимости является наличие длины волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум интенсивности излучения. Однако все попытки объяснить эту зависимость на основе теории Максвелла оказались безуспешными.

Похожая ситуация сложилась и в области фотоэффекта. Согласно классической электродинамике интенсивность световой волны определяется её амплитудой и не зависит от частоты. Поэтому на основе этой теории невозможно понять, почему максимальная кинетическая энергия вырванных электронов линейно возрастает при увеличении частоты света. Необъяснимым оказывается и существование красной границы фотоэффекта.

Следует также отметить практическую безынерционность фотоэффекта. Это означает, что явление фотоэффекта возникает сразу же, когда частота излучения превысит значение, соответствующее красной границе фотоэффекта. Это невозможно объяснить с точки зрения электромагнитной природы света, поскольку для того, чтобы световая волна смогла вырвать электрон с поверхности металла, его необходимо сначала «раскачать», а на это требуется определённое время.

КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА Решение проблемы описания излучения абсолютно чёрного тела было найдено в 1900 г. выдающимся немецким физиком М. Планком. Он получил формулу, которая детально воспроизвела экспериментальный спектр излучения абсолютно чёрного тела во всём диапазоне длин волн и частот. Однако эта формула не имела никакого теоретического обоснования, поскольку при её выводе Планк был вынужден сделать весьма необычное предположение о том, что излучение испускается отдельными порциями, или **квантами**.

При этом Планк получил формулу для энергии кванта излучения:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

где ν — частота излучения, а h — коэффициент пропорциональности, названный впоследствии **постоянной Планка**: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Идеи Планка о дискретном характере излучения были успешно использованы также для построения теории фотоэффекта.

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА Теория фотоэффекта была создана в 1905 г. А. Эйнштейном. Анализируя экспериментальные закономерности фотоэффекта, Эйнштейн пришёл к заключению, что излучение не только поглощается отдельными порциями, но и само *обладает прерывистой структурой, т.е. представляет собой поток квантов*. При этом квант может поглотиться только целиком. В дальнейшем эти неделимые порции энергии называли **фотонами**.

Согласно Эйнштейну энергия кванта $h\nu$ расходуется на совершение так называемой **работы выхода** A , т.е. работы, которую нужно совершить для вырывания электрона из металла, и на сообщение ему кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

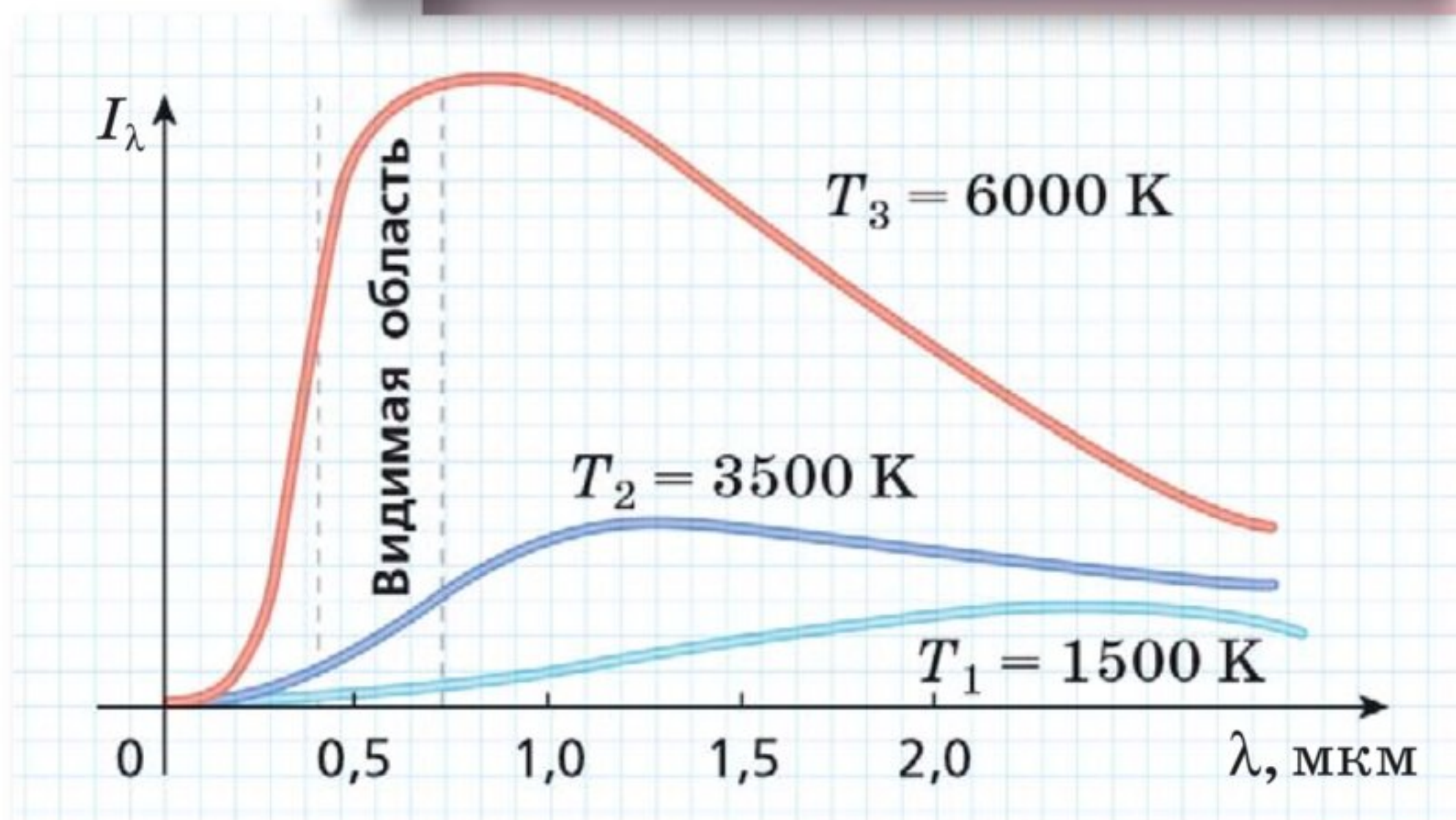
Уравнение (2), получившее название **уравнения Эйнштейна для фотоэффекта**, объясняет все его закономерности. Действительно, согласно уравнению (2) максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов линейно зависит от частоты света: $E_k = h\nu - A$, что находится в полном соответствии с опытом. Из уравнения (2) также видно, что кинетическая энергия не зависит от интенсивности света.

Кроме того, из уравнения Эйнштейна следует, что фотоэффект возможен лишь при условии $h\nu \geq A$. Поэтому наименьшую частоту $\nu_{\min}$, при которой возможен фотоэффект для данного металла, можно найти из условия $h\nu_{\min} = A$. Следовательно, красная граница фотоэффекта определяется формулой $\nu_{\min} = A/h$.

Работа выхода зависит от рода вещества, поэтому и красная граница для разных веществ различна.

Квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль. Появление его возмущало нечто совершенно новое, дотоле неслыханное, что, казалось, требовало преобразования самых основ нашего физического мышления...

Макс Планк



Если обозначить величины: частота излучения — ν , работа выхода электрона из вещества — A , скорость высвобожденного электрона — v , масса электрона — m , постоянная Планка — h , то уравнение Эйнштейна для фотоэффекта записывают в виде

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

ВОПРОСЫ:

- Какую роль сыграли законы излучения абсолютно чёрного тела и фотоэффекта в развитии квантовой теории?
- В чём состоит главная идея квантовой гипотезы?
- Можно ли утверждать, что уравнение Эйнштейна является отражением закона сохранения энергии?
- Частота света, падающего на фотокатод, уменьшилась вдвое. Уменьшилась ли при этом в два раза максимальная кинетическая энергия вырванных электронов?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключался опыт Лебедева и какова была его главная цель.
- К каким выводам пришёл Лебедев на основе своих измерений.
- Что такое импульс фотона.
- Как связаны энергия и импульс фотона.
- Как давление света объясняется на основе квантовых представлений.
- В чём заключается различие между волновыми и корпускулярными представлениями о природе света.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое давление и каковы единицы давления?
- Что такое интерференция и дифракция света?
- Что такое дисперсия и поляризация света?
- Что такое фотон и как рассчитать его энергию?



Пётр Николаевич Лебедев
(1866—1912)

Выдающийся русский физик-экспериментатор, первым подтвердивший на опыте вывод Максвелла о наличии светового давления.



ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

Обнаружение давления света и теоретическая интерпретация этого явления сыграли важную роль в выяснении природы света. По мере накопления всё новых опытных данных о взаимодействии света с веществом в начале XX в. вновь возникла дискуссия между сторонниками двух точек зрения на природу света.

ОПЫТ ЛЕБЕДЕВА Максвелл на основе разработанной им электромагнитной теории света обосновал вывод о том, что свет должен оказывать давление на вещество. Поэтому для доказательства справедливости теории Максвелла требовалось измерить давление света опытным путём. Дело осложнялось тем, что световое давление крайне мало, и многие попытки по его обнаружению оказались безуспешными.

Впервые давление света удалось измерить в 1899 г. русскому физiku П. Н. Лебедеву. Экспериментальная установка Лебедева представляла собой чувствительные крутильные весы, состоящие из лёгкой рамки с укреплёнными на ней двумя парами очень тонких крылышек из фольги: поверхность у одной из них была зачернённой, а у другой — зеркальной. Вся конструкция подвешивалась на кварцевой нити и помещалась в стеклянный сосуд, из которого откачивался воздух.

При падении света на устройство он практически полностью отражался от зеркальных крылышек, и поэтому давление света на зеркальные поверхности было почти вдвое бóльшим, чем на зачернённые. В результате возникал момент сил, поворачивающий рамку. По углу закручивания нити измерялось световое давление.

На основе многочисленных опытов Лебедев пришёл к заключению, что полученные им результаты полностью согласуются с теоретическими выводами Максвелла. Следовательно, эксперименты П. Н. Лебедева сыграли важную историческую роль в опытном обосновании электромагнитной природы света.

ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА Как известно, начиная с работ Ньютона и Гюйгенса предметом дискуссии были две альтернативные точки зрения на природу света: корпускулярная и волновая теории. Ситуация изменилась в XIX в., когда на основе теоретических и экспериментальных работ Юнга и Френеля, а также работ Максвелла по электромагнетизму в физике, как казалось, окончательно победили сторонники волновых представлений о природе света. Действительно, такие явления, как интерференция, дифракция, по-

ляризация и дисперсия света, могут быть объяснены только в рамках *волновых* представлений. Измерение давления света Лебедевым явилось дополнительным аргументом, подтверждающим справедливость электромагнитной природы света. Вместе с тем опыты Герца и Столетова по фотоэффекту и их теоретическое осмысление Эйнштейном показали ограниченность вывода о том, что все свойства света могут быть объяснены исключительно в рамках волновой теории. Действительно, поскольку свет при испускании и поглощении ведёт себя подобно потоку частиц с энергией $E = h\nu$, то обнаруживаемые при этом свойства света следует называть *корпускулярными*.

Поэтому, если рассматривать свет как поток квантов или фотонов, на них также, согласно теории относительности, должна также выполняться взаимосвязь между энергией, массой и импульсом:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (1)$$

Так как масса фотона равна нулю, а его энергия, как было сказано выше, равна $E = h\nu$, то из формулы (1) следует, что импульс фотона равен

$$p = \frac{h\nu}{c}. \quad (2)$$

Таким образом, несмотря на то, что движущийся со скоростью света фотон и является безмассовой частицей, он обладает энергией и импульсом.

Наличие импульса у фотона естественным образом позволяет объяснить причину возникновения давления света. Действительно, если на зеркальную поверхность крылышек в опыте Лебедева падает поток фотонов, то полный импульс, переданный крылышку отражённым фотоном, будет вдвое превосходить импульс падающего кванта:

$$\Delta p = \frac{h\nu}{c} - \left(-\frac{h\nu}{c}\right) = 2\frac{h\nu}{c}.$$

Но давление, как это следует из второго закона Ньютона, численно равно импульсу, передаваемому единице площади поверхности тела в единицу времени.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ Тот факт, что свет обладает свойствами частиц, вовсе не означает возврата к корпускулярной теории Ньютона. Как уже отмечалось выше, целый ряд свойств света может быть объяснён только в рамках волновой теории.

Таким образом, природа света оказалась двойственной, или, другими словами, свету присущ так называемый *дуализм*. Свет обладает как непрерывными (волновыми), так и дискретными (корпускулярными) свойствами.

На границе земной атмосферы давление солнечного излучения составляет всего лишь 10^{-6} Па. Вместе с тем внутри звёзд при температурах в десятки миллионов кельвин давление излучения достигает значений 10^{18} Па!

Далеко не все физики в начале XX в. с доверием восприняли идею Эйнштейна о квантах света. Положение, что свет является электромагнитной волной, казалось незыблемым и не нуждающимся в каких-либо дополнениях. Ситуация кардинально изменилась после 1922 г., когда американский физик А. Комптон при изучении рассеяния рентгеновского излучения на электронах атомов вещества обнаружил возрастание длины волны у рассеянного излучения. Этот факт резко противоречил волновой теории: согласно электродинамике Максвелла рассеянное излучение должно характеризоваться той же длиной волны, что и падающее излучение. Объяснение эффекта Комптона было получено только на основе квантовых представлений о свете.

ВОПРОСЫ:

- Зачем в опыте Лебедева из сосуда, в который помещалась рамка с крылышками, откачивался воздух?
- Почему давление света на чёрную поверхность отличается от давления на зеркальную?
- Можно ли импульс фотона выразить через длину волны излучения?
- В чём заключается сущность корпускулярно-волнового дуализма?
- Можно ли утверждать, что волновые свойства света являются более важными, чем корпускулярные?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что представляла собой модель атома, предложенная Томсоном.
- В чём заключалась основная цель опытов Резерфорда.
- Какую модель строения атома предложил Резерфорд.
- Как на основе ядерной модели объясняются результаты опытов по рассеянию α -частиц на тонких металлических мишенях.

ВСПОМНИТЕ:

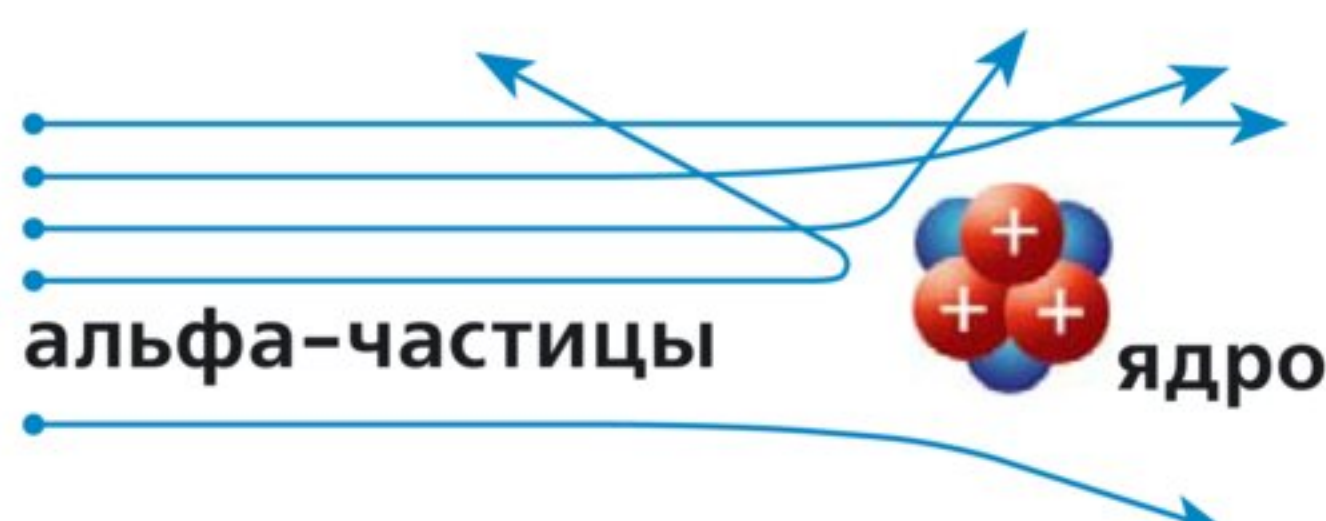
- Из каких частиц состоят все вещества и что такое атом?
- Как взаимодействуют между собой заряженные частицы?

Модель
атома
Томсона



Эрнест Резерфорд
(1871—1937)

Английский физик, создал планетарную модель атома, лауреат Нобелевской премии по химии.



МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Конец XIX — начало XX в. ознаменовались целым рядом выдающихся открытий в области строения вещества. Один только факт открытия электрона означал, что эта частица каким-то образом входит в состав атомов, которые, по-видимому, сами являются составными объектами.

МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА Одну из первых моделей строения атома предложил в 1903 г. английский физик Дж. Томсон, который является автором открытия электрона. В модели Томсона, получившей название «пудинговой», атом представляет собой положительно заряженный шар, заряд которого равномерно распределён по всему объёму. В этот шар вкраплены электроны, как изюминки в кекс.

Радиус атома по порядку величины оценивался примерно в 10^{-10} м, что соответствовало уже известному в то время расстоянию между плоскостями кристаллической решётки в металлах. Как полагал Томсон, повторяемость химических свойств элементов в порядке возрастания их атомной массы может быть объяснена, если будет установлена закономерность распределения электронов внутри объёмного положительно заряженного шара.

Однако дальнейшие исследования показали, что модель атома Томсона категорически противоречила результатам опытов по изучению распределения положительного заряда внутри атома.

ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА Классические опыты по проверке характера распределения заряда атома были осуществлены в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом. В качестве инструмента, с помощью которого Резерфорд и его сотрудники исследовали структуру атома, были использованы быстрые заряженные частицы, которые излучаются химическим элементом радием. Эти частицы представляют собой полностью ионизированные атомы гелия и называются α -частицами. Они обладают положительным зарядом, равным по модулю удвоенному элементарному заряду, а их масса почти в 8000 раз превосходит массу электрона. Скорость испускаемых радием α -частиц очень велика и достигает 20 000 км/с.

В своих опытах Резерфорд изучал рассеяние α -частиц при их прохождении через тонкие листы металлической фольги. При этом он отчётливо понимал, что электроны, масса которых очень мала по сравнению с массой α -частиц, не могут существенно повлиять на траекторию α -частицы. Заметное рассеяние α -частиц может быть вызвано только положительным зарядом атома.

Экспериментальная установка Резерфорда состояла из свинцового контейнера, снабжённого узким каналом,

куда помещалась крупца радия, мишени в виде тонкой металлической фольги и экрана, покрытого слоем сернистого цинка. При попадании быстрых α -частиц на экран в местах соударений возникали крохотные вспышки света, которые можно было наблюдать с помощью микроскопа. Специальное устройство позволяло перемещать экран и микроскоп по кругу вокруг мишени.

Как показали опыты, подавляющее большинство α -частиц пронизывало тонкие мишени почти без отклонения от первоначального прямолинейного распространения. Хотя полученные результаты в целом не противоречили модели Томсона, Резерфорд, будучи блестящим экспериментатором, предложил своим сотрудникам на всякий случай проверить возможность рассеяния на большие углы. Вопреки первоначальным ожиданиям оказалось, что весьма незначительная часть α -частиц (примерно одна из двух тысяч) испытывала рассеяние на углы, большие 90° .

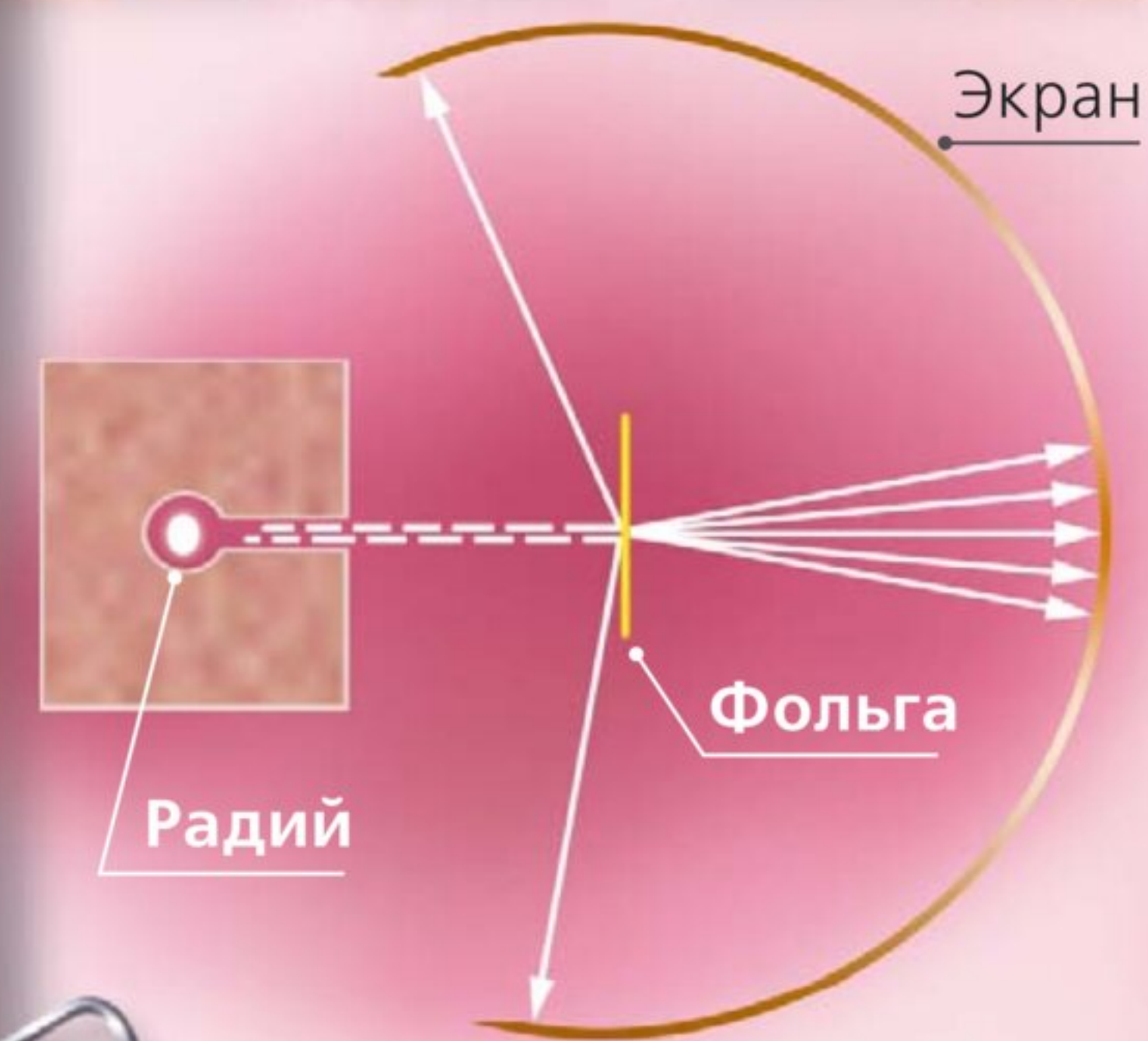
Более того, были зафиксированы отдельные события, соответствующие рассеянию α -частиц в направлении, прямо противоположном направлению первоначального движения.

Эти результаты оказались совершенно неожиданными для Резерфорда и требовали осмысления. Действительно, чтобы при взаимодействии с атомом вещества α -частица была отброшена назад, она должна была столкнуться с неким массивным и очень малым по размеру образованием внутри атома.

ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА Опираясь на полученные результаты, Резерфорд пришёл к заключению, что рассеяние α -частиц на большие углы можно объяснить, если предположить, что положительный заряд в атоме, вопреки модели Томсона, не распределён равномерно по объёму в шаре радиусом 10^{-10} м, а локализован в центре атома в области пространства, много меньшего размеров самого атома. В этой области — атомном ядре — сосредоточена практически вся масса атома.

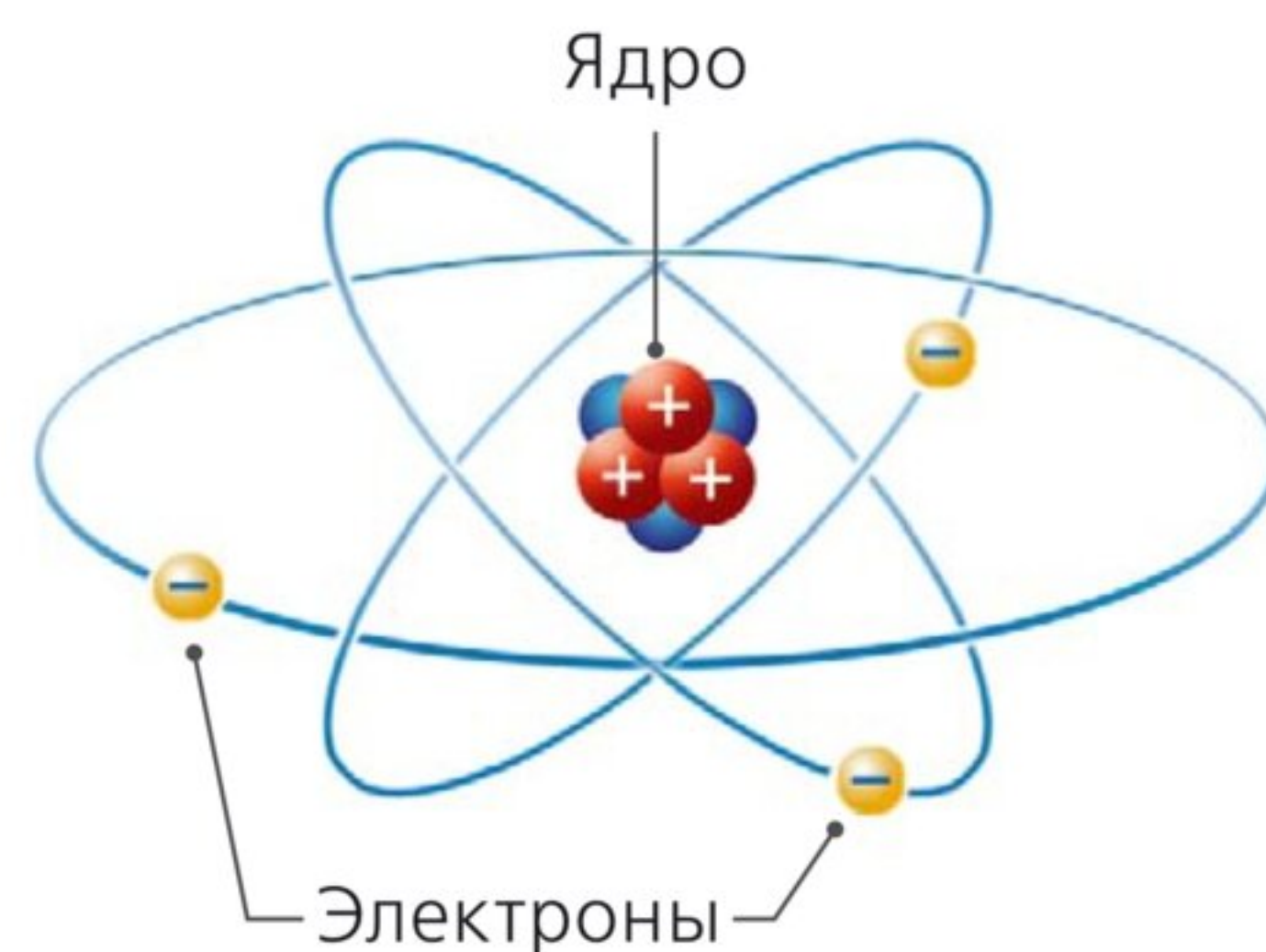
Согласно расчётам Резерфорда для объяснения опытов по рассеянию α -частиц необходимо допустить, что диаметр ядра должен быть порядка 10^{-15} м. При этом электроны атома движутся вокруг ядра подобно тому, как обращаются планеты вокруг Солнца. Поэтому модель атома Резерфорда часто называют **планетарной моделью**. В этой модели радиус атома принимается равным радиусу орбиты самого удалённого от ядра электрона.

Ядерная модель атома хорошо объясняет, почему подавляющая часть α -частиц весьма слабо взаимодействует с атомами вещества. Действительно, поскольку почти всё пространство между атомным ядром и движущимися вокруг него электронами пустое, быстрые заряженные частицы способны практически свободно двигаться между плоскостями кристаллической решётки металлов.



Рассеяние назад... невозможно объяснить, если не считать, что основная часть массы атома сконцентрирована в небольшом ядре. Именно тогда у меня возникла идея атома с крохотным тяжёлым центром, несущим заряд...

Э. Резерфорд



Планетарная модель строения атома

ВОПРОСЫ:

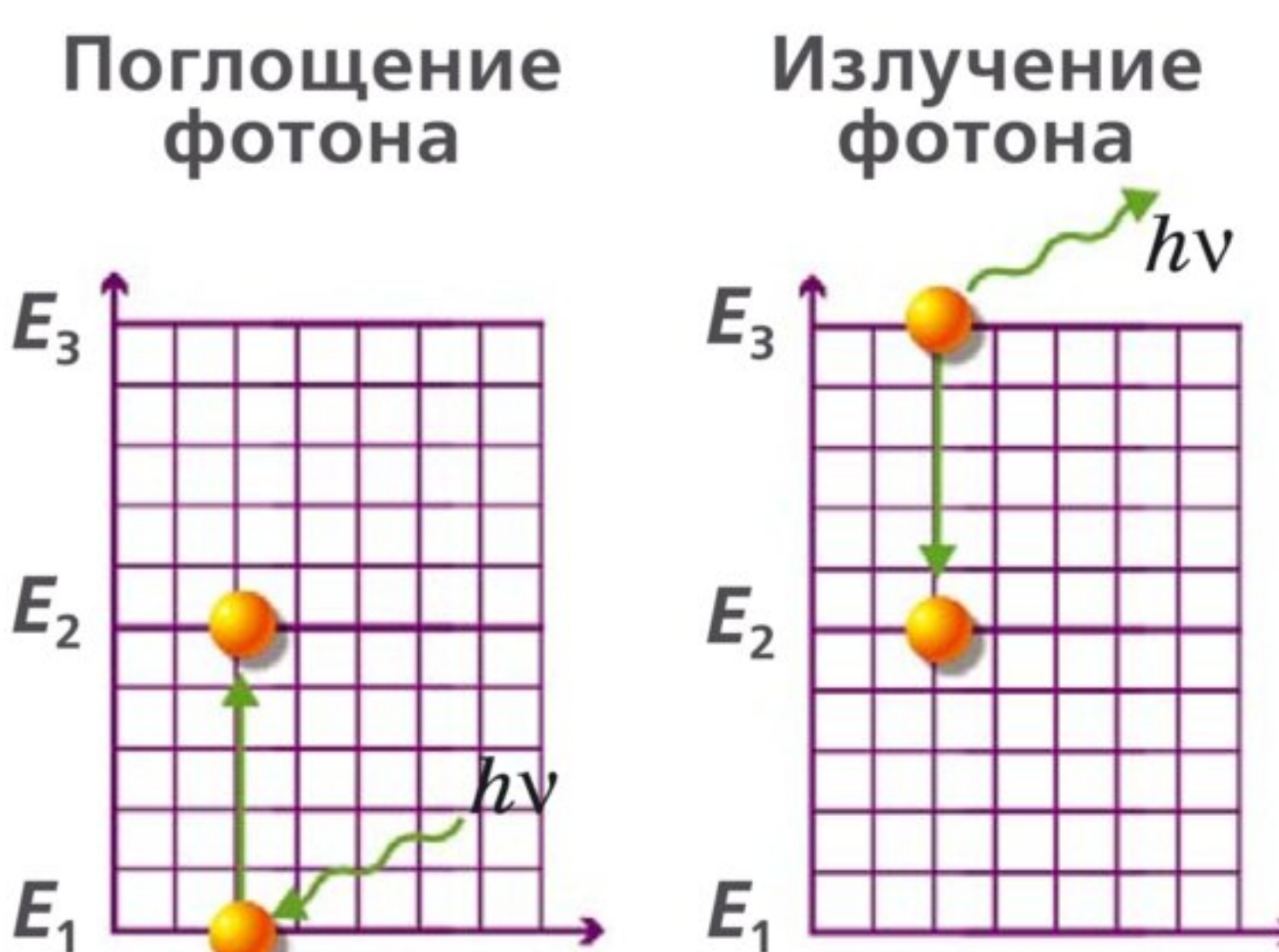
- В чём заключалась главная особенность строения атома в модели, предложенной Томсоном?
- Почему электроны, входящие в состав атома, не могут оказывать заметного влияния на рассеяние α -частиц?
- К каким выводам о строении атома пришёл Резерфорд на основе результатов своих опытов?
- Как ядерная модель атома объяснила особенности рассеяния α -частиц на тонких мишенях?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключались недостатки планетарной модели атома Резерфорда.
- Что такое стационарные состояния атома, введённые Бором в качестве постулата.
- Как модель атома Бора объясняет происхождение линейчатых спектров.
- Какие опыты подтвердили справедливость основных положений теории Бора.

ВСПОМНИТЕ:

- Какую модель строения атома предложил Резерфорд?
- Какие опытные данные объяснила модель атома Резерфорда?
- Что представляют собой линейчатые спектры испускания и поглощения вещества?



Нильс Хенрик Давид Бор
(1885—1962)

Датский физик, исследовал строение атомов и испускаемое ими излучение, лауреат Нобелевской премии по физике.

АТОМ БОРА

Несмотря на то что планетарная модель атома успешно объясняла опыты по рассеянию α -частиц веществом, эта модель противоречила основным положениям электродинамики. Поэтому становилось очевидным, что законы классической физики неприменимы для описания явлений на атомных масштабах.

НЕДОСТАТКИ ПЛАНЕТАРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА Планетарная модель атома Резерфорда обладала серьёзными недостатками. Действительно, согласно законам электродинамики электроны, движущиеся с колоссальным ускорением вокруг ядра атома, излучают электромагнитные волны. Поэтому их энергия должна уменьшаться. В результате через очень малое время электрон должен был неизбежно упасть на ядро, и атом прекратил бы своё существование. Однако ничего подобного не происходит — атом весьма устойчив.

Дополнительным аргументом, подтверждающим противоречивый характер модели атома Резерфорда, служило то обстоятельство, что планетарная модель никак не объясняла, почему каждому химическому элементу соответствуют определённые линейчатые спектры и почему линии испускания и поглощения в спектрах совпадают.

КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА Выход из, казалось бы, тупиковой ситуации нашёл в 1913 г. молодой датский физик Н. Бор. Бор отчётливо понимал, что законы классической физики, по своей сути, приспособлены для описания непрерывных процессов. Однако дискретный характер спектральных линий, испускаемых атомами химических элементов, свидетельствовал о том, что внутриатомным процессам свойственна определённая прерывистость. Бор, оставаясь в рамках представлений, что движение электронов происходит по определённым траекториям и в каждый момент времени характеризуется определёнными значениями координат и скоростей, сформулировал два постулата.

Первый постулат Бора утверждает: атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, которым соответствуют определённые дискретные значения энергии $E_1, E_2, E_3, \dots$. В этих состояниях, вопреки законам классической электродинамики, атом не излучает.

Согласно **второму постулату** Бора при переходе атома из стационарного состояния с энергией E_n в состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант энергии, частота которого определяется уравнением

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Излучение кванта энергии (фотона) происходит при переходе электрона в атоме из состояния с большей энергией

в состояние с меньшей энергией. Соответственно поглощение атомом энергии сопровождается переходом электрона из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией. При этом энергия фотона, поглощаемого атомом при переходе, например, из состояния с наименьшей энергией E_1 в возбуждённое состояние с энергией E_2 , в точности равна энергии фотона, излучаемого атомом при обратном переходе. Поэтому равны и частоты указанных переходов.

Отсюда становится понятным, что переходы между стационарными состояниями естественным образом объясняют происхождение линейчатых спектров испускания и поглощения. Равенство частот прямых и обратных переходов между стационарными состояниями одного и того же вещества объясняет также совпадение положения линий в линейчатых спектрах испускания и поглощения.

ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМА

Согласие расчётов положений спектральных линий атома водорода по модели Бора с опытными данными свидетельствовало о существовании стационарных состояний атома. Вместе с тем потребовались дополнительные эксперименты, которые могли непосредственно подтвердить или опровергнуть этот главный постулат теории Бора.

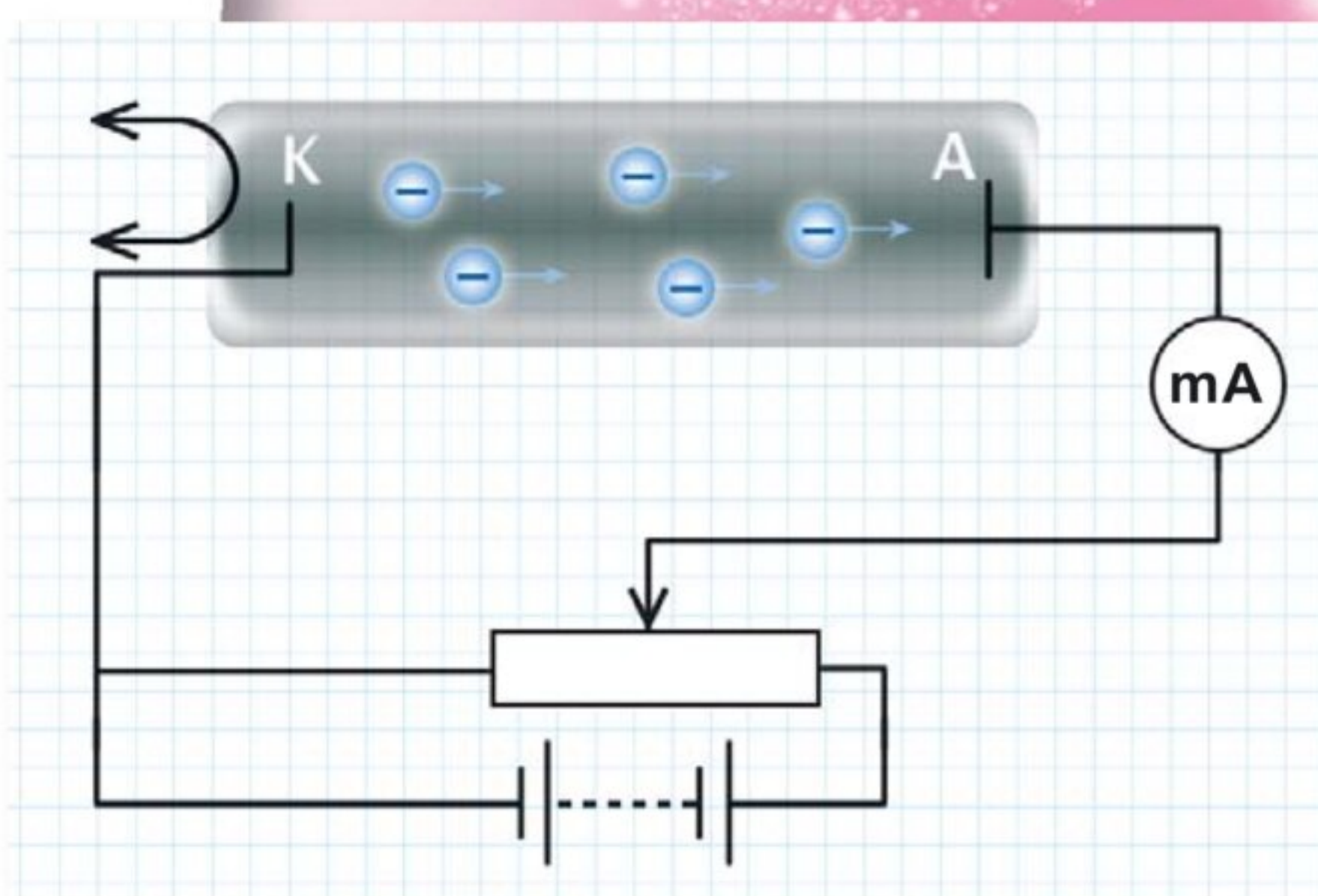
Такие опыты были осуществлены в 1913 г. немецкими физиками Дж. Франком и Г. Герцем. В опытах изучалось столкновение электронов, ускоренных электрическим полем, с атомами паров ртути, заполнявших стеклянную трубку. Как показали опыты, с ростом напряжения между электродами трубки возрастала и сила тока в анодной цепи, что свидетельствовало об увеличении кинетической энергии электронов, излучаемых катодом K . Однако при некотором определённом значении напряжения происходило резкое уменьшение силы тока в цепи анода A . Последнее означало, что электроны практически полностью теряли свою энергию в результате столкновений с атомами ртути. При этом большая часть энергии электронов превращалась в энергию возбуждения атомов ртути. Такие столкновения называются **неупругими столкновениями**. В тех же случаях, когда энергия электронов была меньше некоторого определённого значения, их столкновения с атомами носили **упругий** характер. При таких столкновениях электроны не передавали энергию атомам.

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что внутренняя энергия атома не может принимать произвольные значения. Другими словами, у атома существует набор определённых дискретных состояний, энергии которых различаются. Поэтому и изменения энергии атома носят дискретный характер.

Обобщая сказанное выше, можно утверждать, что опыты Франка и Герца явились прямым доказательством справедливости основных положений теории Бора.

Стационарное состояние атома с минимальной энергией E_1 называют основным. Без внешнего воздействия атом в этом состоянии может находиться бесконечно долго. Все остальные стационарные состояния атома с энергиями $E_2, E_3, \dots$ называют возбуждёнными состояниями. Время жизни атомов в возбуждённых состояниях обычно не превышает 10^{-8} с.

Свои правила квантования Бор ввёл без всякого обоснования. Этот пример является одним из удивительных случаев озарения и интуиции в науке. Известно высказывание А. Эйнштейна по этому поводу: «Это высшая музыкальность в области теоретической мысли».



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Почему планетарная модель атома Резерфорда не могла объяснить устойчивость атома?
- Сформулируйте квантовые постулаты Бора.
- Как модель атома Бора объясняет устойчивость атома и происхождение линейчатых спектров?
- Опишите опыты Франка и Герца и объясните их результаты.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключаются принципиальные недостатки теории Бора.
- В чём состоит гипотеза Бройля.
- Какие экспериментальные данные свидетельствуют о существовании волновых свойств частиц вещества.
- Что такое квантовая механика.

ВСПОМНИТЕ:

- Что собой представляет модель атома Бора?
- В чём заключается двойственность природы света?

АТОМ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Теорию Бора можно рассматривать как один из первых этапов в развитии квантовых представлений о строении атома. На самом деле построение количественной теории атома потребовало развития совершенно новых понятий о свойствах микромира.

ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА Как известно, наибольшего успеха теория Бора достигла при описании самого простого атома — атома водорода. Правда, вычислив с высокой точностью частоты спектральных линий атома водорода, эта теория оказалась не в состоянии описать их интенсивности. Однако все попытки применить подход Бора для объяснения спектров следующих за водородом атомов гелия и лития закончились неудачей.

На самом деле трудности теории Бора были не случайными. Её внутренняя противоречивость заключалась прежде всего в том, что наряду с квантовыми постулатами в теории использовались классические законы механики Ньютона и электродинамики Максвелла. Например, представление об определённых орбитах, по которым движется электрон в модели атома Бора, не имеет ничего общего с реальным характером движения электрона в атоме.

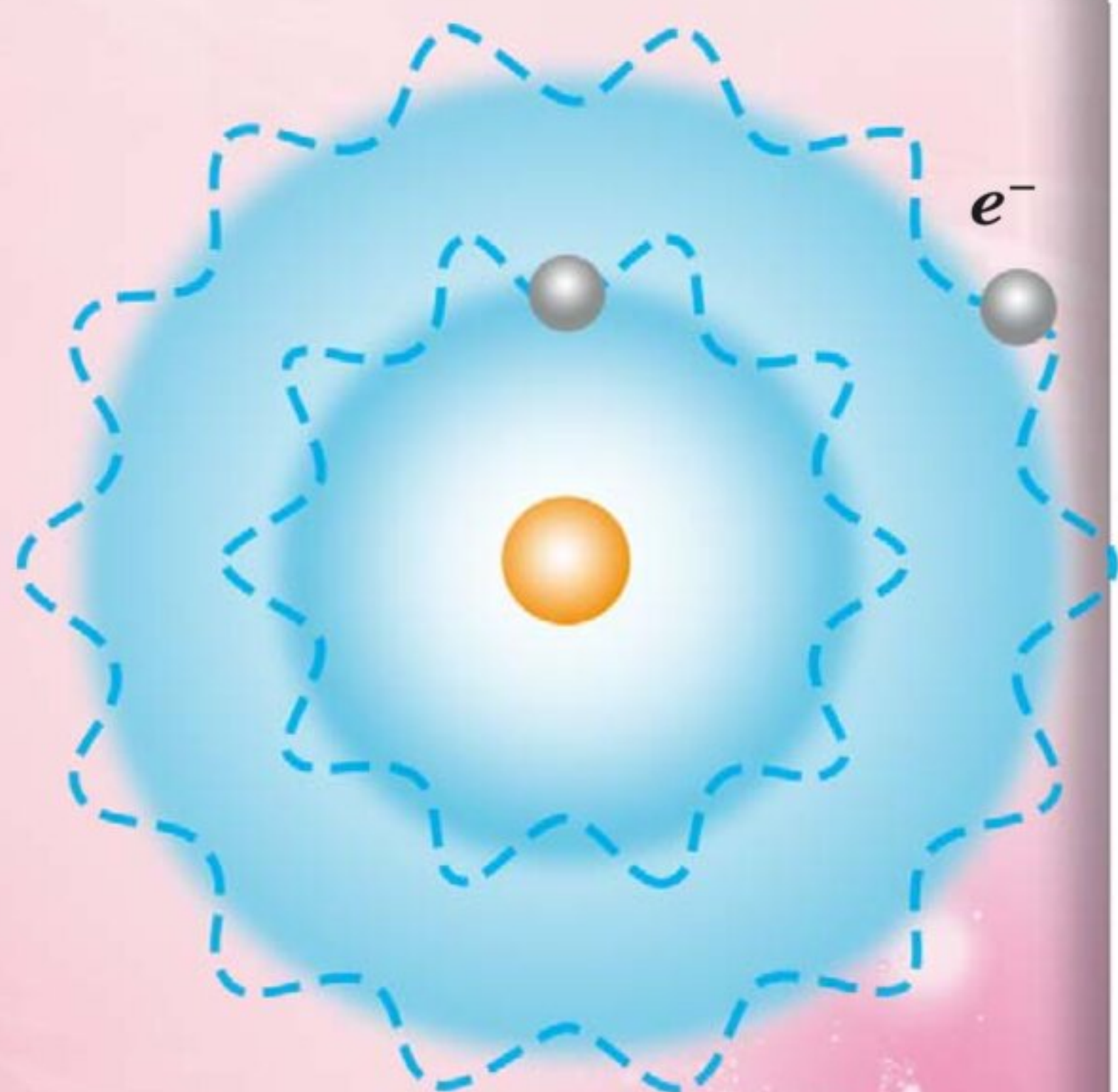
Поэтому для объяснения многих свойств атомов и других микрообъектов потребовался радикальный пересмотр целого ряда фундаментальных понятий и представлений о физике микромира. Такому пересмотру во многом способствовали обнаружение волновых свойств частиц и открытие вероятностного характера внутриатомных процессов.

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА Как уже отмечалось ранее, благодаря работам Эйнштейна по теории фотоэффекта, а также опытам Комптона по рассеянию рентгеновского излучения на электронах вещества было установлено, что свет обладает не только свойствами волн, но и свойствами частиц. Эта двойственность природы света в течение целого ряда лет являлась, пожалуй, одной из самых интригующих черт физической картины мира.

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль высказал крайне необычную гипотезу о том, что сочетание волновых и корпускулярных свойств присуще не только свету, а вообще всем материальным объектам. Согласно предположению де Бройля поведение частиц, например электронов, должно описываться некоторым волновым процессом с длиной волны λ , связанной с импульсом электрона p так же, как связана длина волны фотона с его импульсом: $\lambda = h/p$, где h — постоянная Планка.

Наличие волновых свойств у электронов было обнаружено К. Дэвиссоном и А. Джермером, а также независимо

Одно из возможных распределений электрона в атоме («электронное облако» вместо электронной орбиты)



$$\frac{2\pi r_n}{\lambda} = n$$

r_n — радиус n -й орбиты электрона в атоме

от них Дж. Томсоном и П. С. Тартаковским. Дэвиссон и Джермер экспериментально наблюдали дифракцию электронов при их отражении от поверхности монокристалла. Об этом свидетельствовало возникновение максимумов и минимумов интенсивности потока отражённых электронов при изменении угла падения пучка на кристалл. Эти опыты можно объяснить, если рассматривать кристалл как дифракционную решётку, а поток электронов отождествлять с волновым процессом.

Концепция волн де Бройля позволила дать физическую интерпретацию правилам квантования Бора, которые он угадал благодаря своей гениальной интуиции. Согласно волновому подходу для электрона в атоме возможны только такие круговые орбиты, на которых укладывается целое число длин волн де Бройля. При этом энергии электрона, соответствующие указанным стационарным состояниям, являются дискретными и зависящими от числа дебройлевских волн.

ПОНЯТИЕ О КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ На самом деле формализм волн де Бройля оказался не в состоянии дать непротиворечивое описание поведения объектов микромира, в частности электронов. Прежде всего было непонятно, что такое дебройлевская волна. Известно, что сам де Бройль, а также многие другие физики в то время рассматривали указанные волны как волны реальные, в какой-то мере напоминающие электромагнитные волны. Решение вопроса о природе корпускулярно-волнового дуализма оказалось весьма непростой задачей для физиков. Все попытки механического соединения корпускулярных и волновых свойств в одном микрообъекте потерпели неудачу.

Ключ к решению проблемы последовательного и непротиворечивого описания явлений микромира предложил в 1926 г. немецкий физик Макс Борн. Его подход был основан на идее рассматривать волны де Бройля как *волны вероятности*.

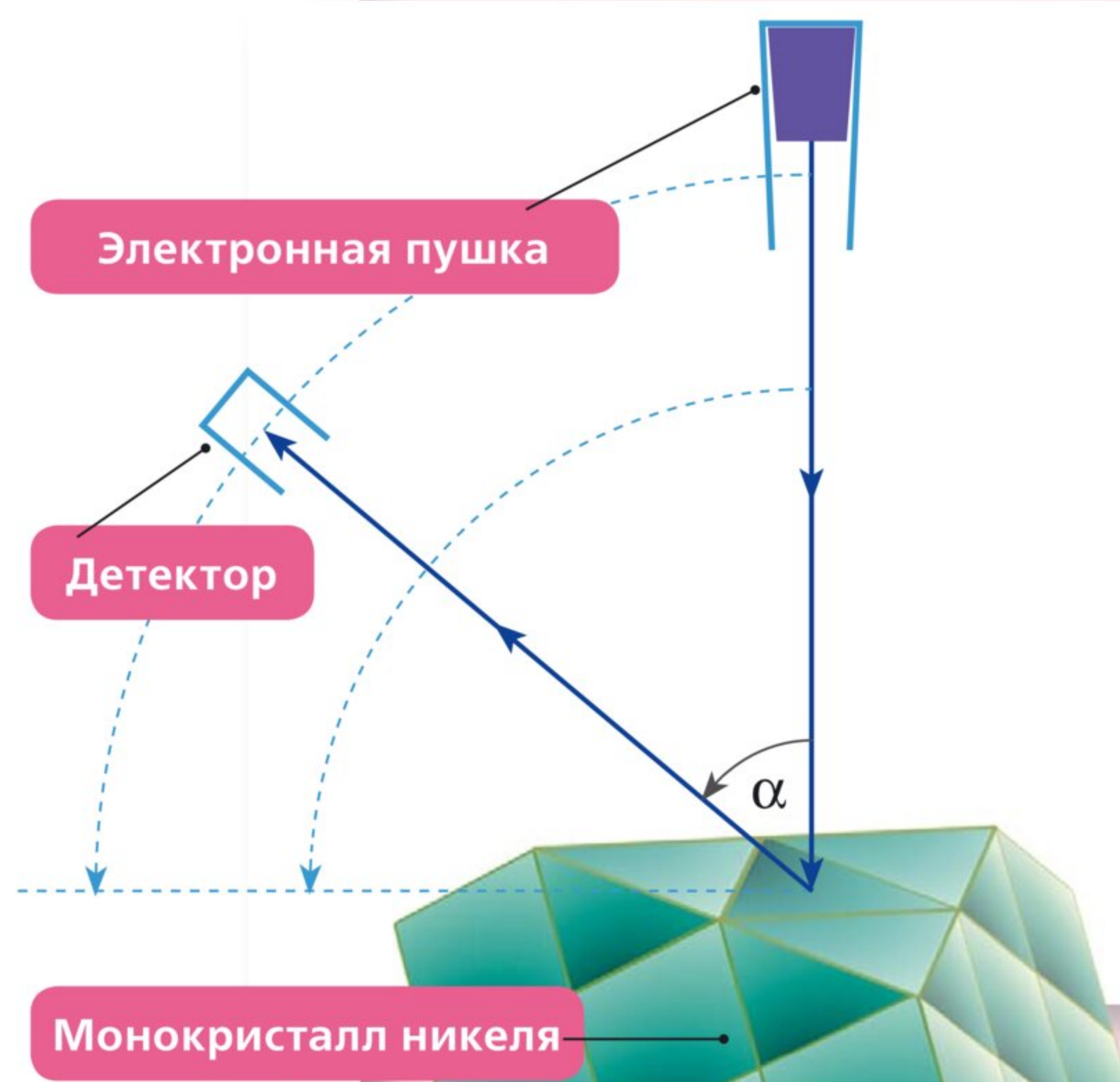
В течение 1925—1927 гг. был создан математический аппарат новой теории, получившей название *квантовой механики* (волновой механики). Одним из важнейших понятий этой теории явилось понятие волновой функции, содержащей всю необходимую информацию о микрообъекте. Теоретический анализ опытных данных, осуществлённый с использованием понятия *волновой функции*, показал, что *в основе явлений микромира лежат вероятностные закономерности*. Волновая функция микрочастицы не есть новое физическое поле, она лишь описывает потенциальные возможности тех или иных результатов наблюдений.

Согласно представлениям де Бройля волновыми свойствами должны обладать любые материальные объекты. Оценим, например, дебройлевскую длину волны для песчинки массой 0,1 мг, летящей со скоростью 6 м/с:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-7} \cdot 6} \approx 10^{-27} \text{ м.}$$

Значение длины волны оказалось на 17 порядков меньше размеров атома!

Следовательно, для макроскопических тел волновые свойства не могут быть обнаружены опытным путём.



ВОПРОСЫ:

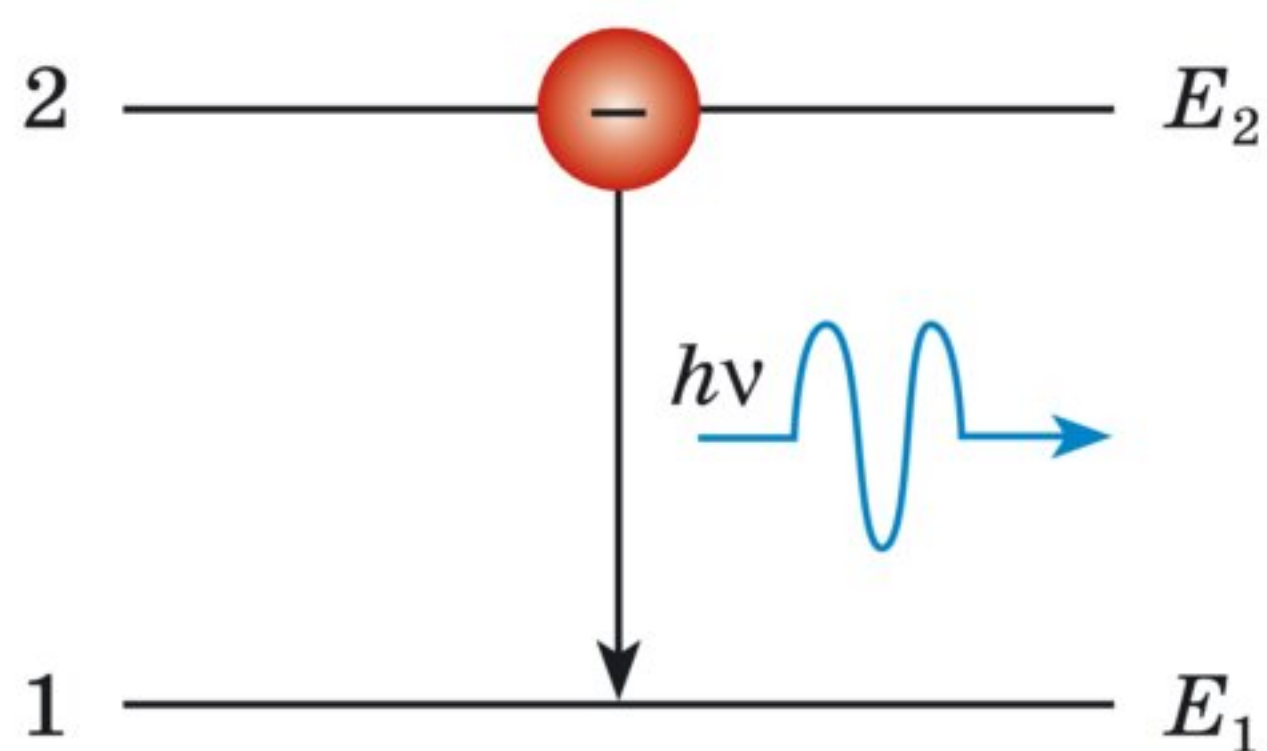
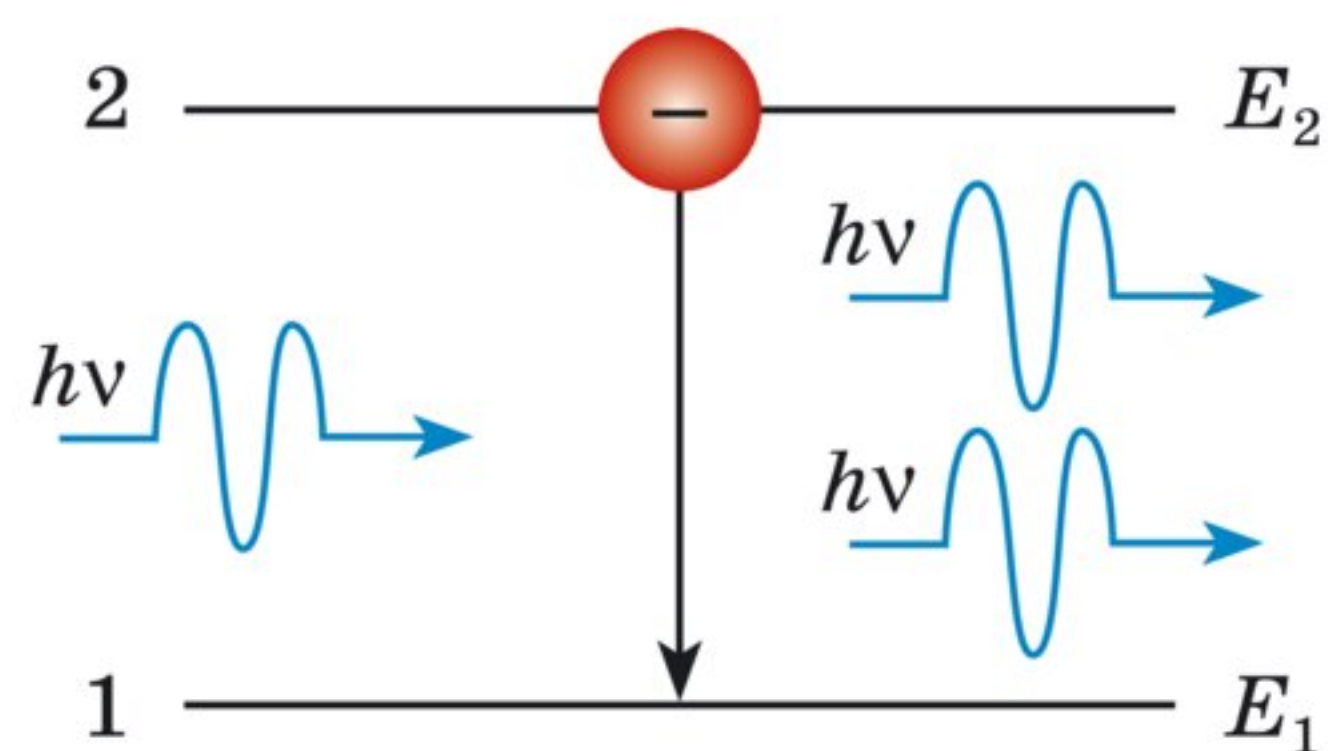
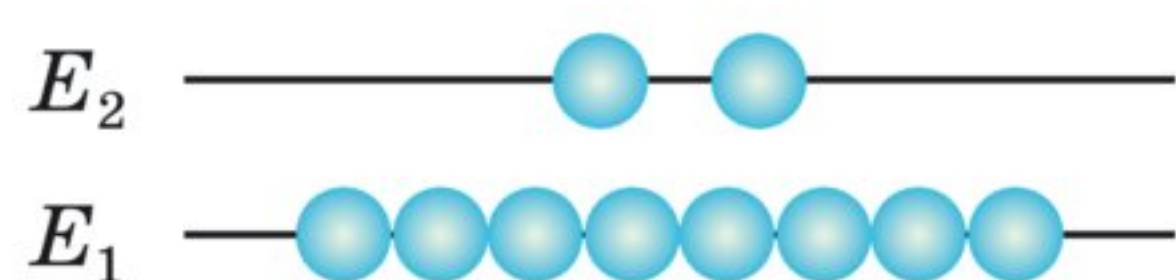
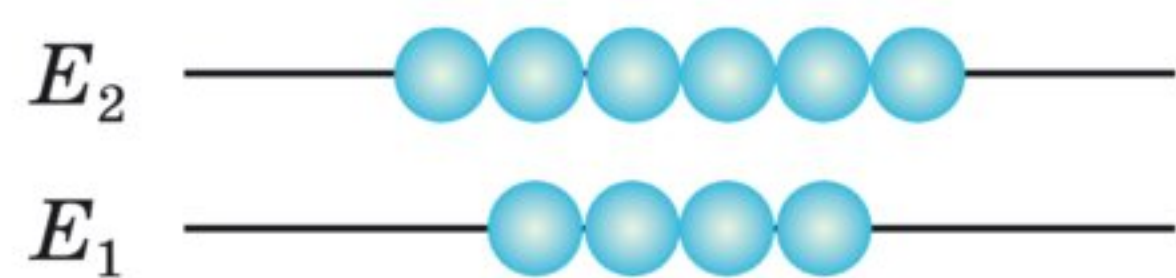
- Почему модель атома Бора оказалась не в состоянии описать свойства атомов, более сложных, чем атом водорода?
- Как связан импульс микрочастицы с длиной дебройлевской волны этой частицы?
- Почему волновые свойства не обнаруживаются для макроскопических тел?
- В чём заключается вероятностное истолкование корпускулярно-волнового дуализма?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое спонтанное и индуцированное излучение атома.
- Как можно увеличить интенсивность света, прошедшего через вещество.
- Что такое инверсная населённость уровней.
- Что такое лазер и каков принцип его работы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое энергетические состояния атома?
- Что такое основное состояние атома и чем оно отличается от всех других возможных состояний?
- Что такое фотон и каковы его основные характеристики?

Спонтанное излучение**Вынужденное излучение****Нормальная населённость уровня****Инверсная населённость уровня**

Работы А.Эйнштейна о механизме излучения света веществом сыграли важную роль в деле практического использования закономерностей излучения. В первую очередь это относится к так называемому индуцированному (вынужденному) излучению.

САМОПРОИЗВОЛЬНОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Под действием некоторых внутренних факторов атом может самопроизвольно перейти из одного энергетического состояния в другое. При этом излучается фотон, и это излучение называется **спонтанным** или **самопроизвольным**.

В 1916 г. А.Эйнштейн теоретически показал, что переход электрона из возбуждённого состояния на более низкое может происходить под влиянием внешнего электромагнитного излучения, частота которого равна частоте перехода атома. Такое излучение атома, причиной которого является внешнее воздействие, называется **вынужденным** или **индуцированным**.

Согласно выводам Эйнштейна в результате взаимодействия возбуждённого атома с внешним фотоном, частота которого равна частоте перехода, получаются два совершенно одинаковых фотона, обладающих одинаковыми энергиями и направлениями движения.

На самом деле при прохождении излучения через вещество происходит поглощение фотонов атомами, находящимися в невозбуждённом состоянии, и излучение фотонов вынужденного излучения атомами, находящимися в возбуждённом состоянии. Поэтому возможность усиления света, на которую указал Эйнштейн, зависит от соотношения числа атомов, находящихся в указанных состояниях. Для увеличения интенсивности излучения после прохождения света через вещество необходимо, чтобы больше половины атомов вещества находилось в возбуждённом состоянии. Следует отметить, что усиление световой волны, обусловленное индуцированным излучением, впервые экспериментально наблюдал в 1951 г. советский физик В. А. Фабрикант.

ИНВЕРСНАЯ НАСЕЛЁННОСТЬ УРОВНЕЙ Если в возбуждённом состоянии находится меньше половины атомов среды, то такое состояние вещества называется **состоянием с нормальной населённостью энергетических уровней**. При таком состоянии вещества усиления излучения наблюдаться не может.

Если же в возбуждённом состоянии находится больше половины атомов вещества, то такое состояние называется **состоянием с инверсной** (от лат. *inversio* — переворачивать) **населённостью уровней**. В том случае, когда среда обладает инверсной населённостью, фотон, возникший в результате самопроизвольного излучения, вызовет

лавинообразный процесс образования идентичных ему фотонов, поскольку на пути вновь рождающихся фотонов чаще встречаются возбуждённые атомы, чем атомы, находящиеся в основном состоянии.

Как показали опыты, создание среды с инверсной населённостью энергетических уровней оказалось трудной задачей, так как время жизни атома в возбуждённом состоянии обычно составляет порядка 10^{-8} с, а затем атом самопроизвольно переходит в основное состояние.

Вместе с тем было обнаружено, что некоторые атомы могут находиться в возбуждённом состоянии довольно длительное по атомным масштабам время — порядка 10^{-3} с. Такие состояния атома называют метастабильными. Поэтому оптически прозрачную среду, атомы которой имеют метастабильные уровни, можно использовать для усиления света.

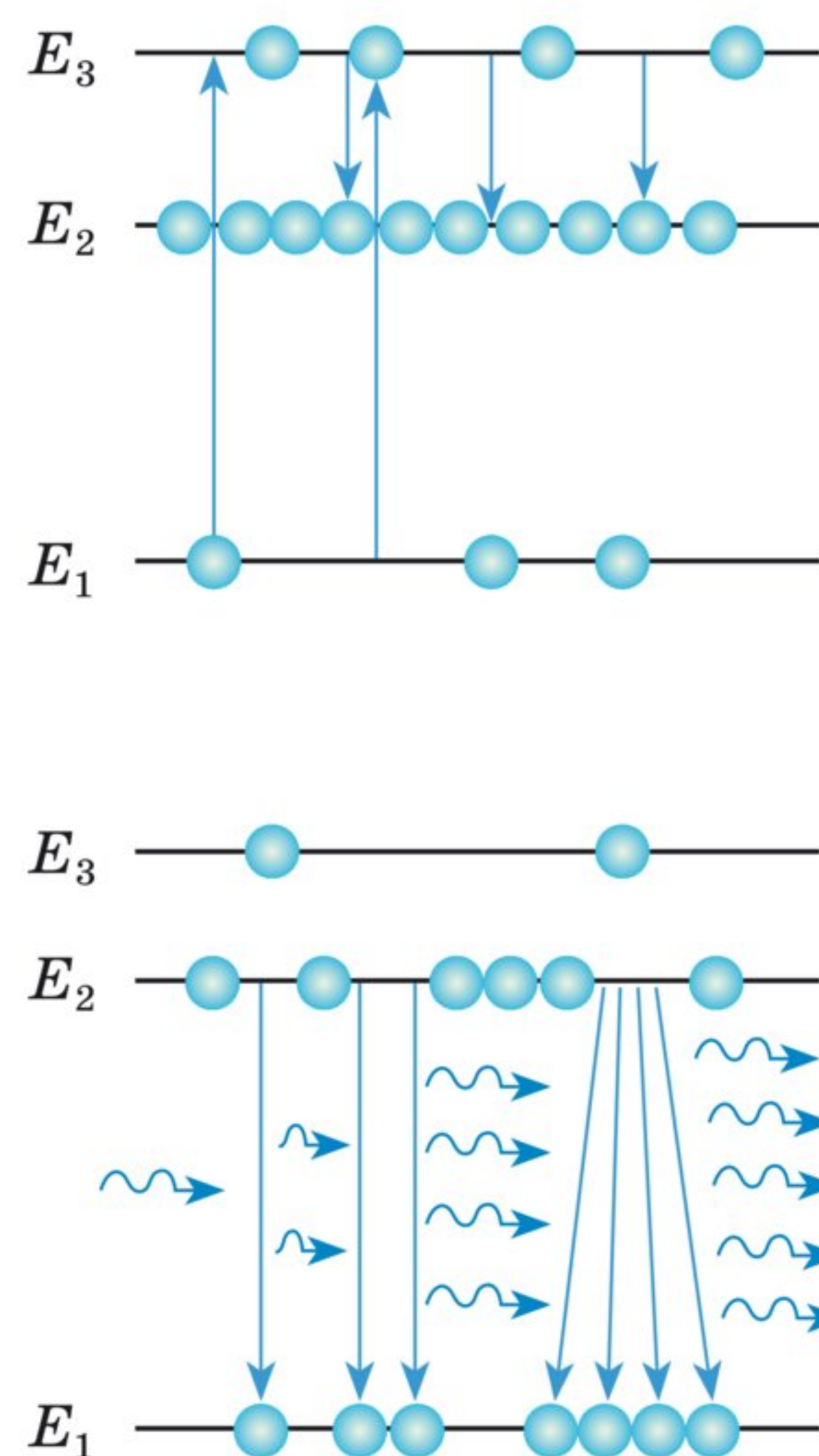
ЛАЗЕР Устройства, предназначенные для получения интенсивной электромагнитной волны вследствие вынужденного излучения, получили название **квантовых генераторов**. Если излучение происходит в интервале длин волн, принадлежащем оптическому диапазону, то квантовые генераторы называют **лазерами**.

Принцип создания первого в мире лазера был предложен в 1955 г. советскими физиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым, а также независимо от них американским физиком Ч. Таунсом.

В первых лазерах активной средой был кристалл рубина Al_2O_3 с примесью около 0,05% атомов хрома. При этом использовалась так называемая *трёхуровневая система создания инверсной населённости*. Для этих целей рубиновый стержень помещался внутрь специальной импульсной спиральной лампы, которая являлась источником возбуждающего излучения. Атом хрома, поглотив излучение с длиной волны около 560 нм из широкого спектра излучения лампы, переходил из основного состояния с энергией E_1 на возбуждённый уровень с энергией E_3 , время жизни которого весьма мало. После этого большая часть атомов совершала переходы с уровня 3 на метастабильный уровень 2 с энергией E_2 . Если хотя бы один атом хрома при этом совершал спонтанный переход с метастабильного уровня на основной уровень, то возникала целая лавина фотонов, порождённая индуцированным излучением атомов хрома, находящихся в метастабильном состоянии.

Для большей концентрации энергии излучения один из торцов рубинового стержня делался зеркальным, а другой — полупрозрачным. Поэтому отражённые от торцов фотоны, летящие вдоль оси кристалла, проходили через активную среду многократно, вызывая индуцированное излучение огромного числа атомов. В результате из кристалла выходило узконаправленное излучение большой мощности.

Рубиновый лазер работает в импульсном режиме. Однако существуют лазеры непрерывного действия. Например, в газовых лазерах этого типа активной средой является газ. При этом генерация излучения осуществляется с помощью электрического разряда. Широкое применение находят также полупроводниковые лазеры непрерывного действия. У этого типа лазеров энергия электрического тока преобразуется в энергию излучения.



Система трёх уровней атома

ВОПРОСЫ:

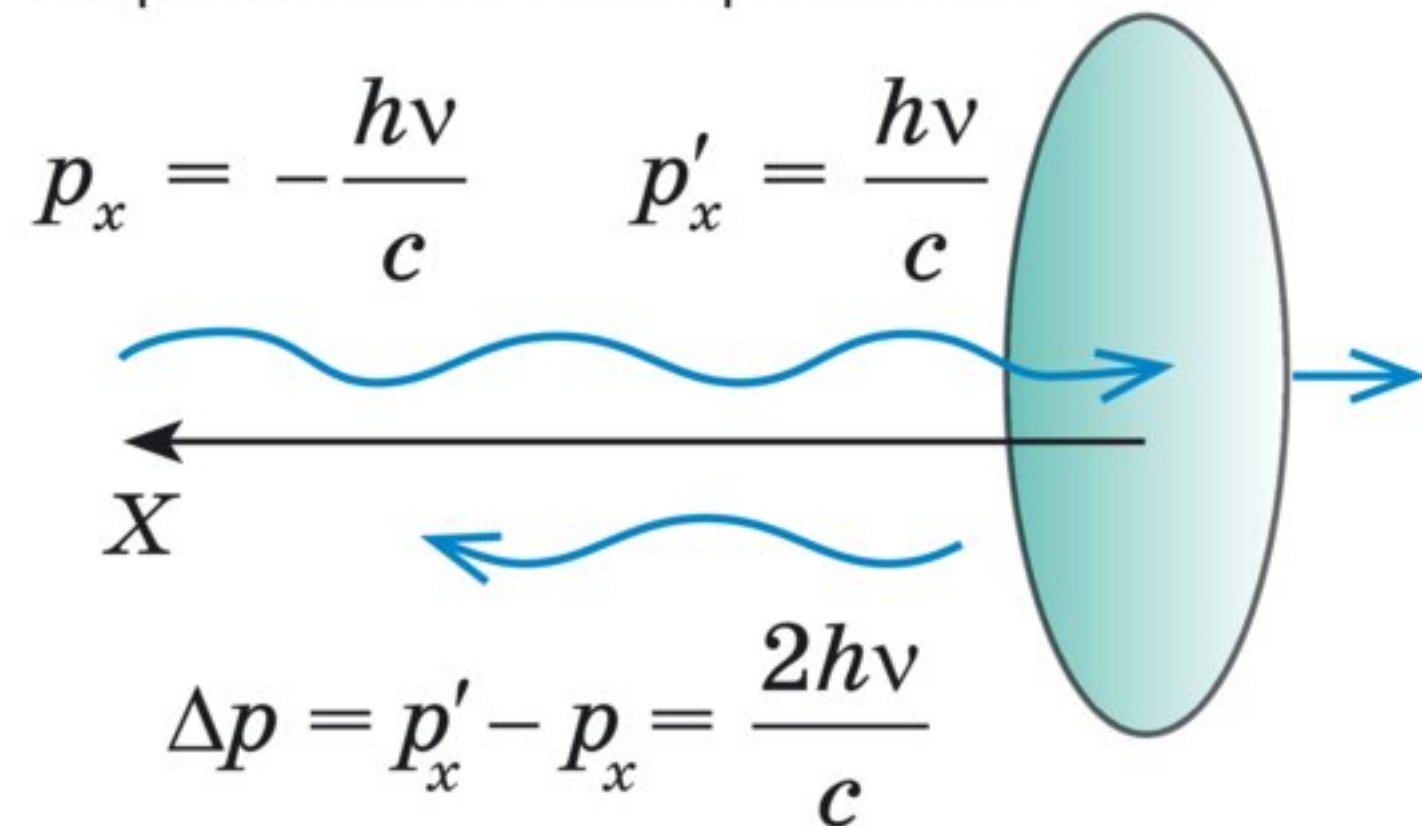
- На каком принципе основана возможность увеличения интенсивности света, прошедшего через вещество?
- Что такое метастабильные состояния атомов?
- На каких физических принципах основана работа рубинового лазера?
- Какие другие типы лазеров существуют в настоящее время?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

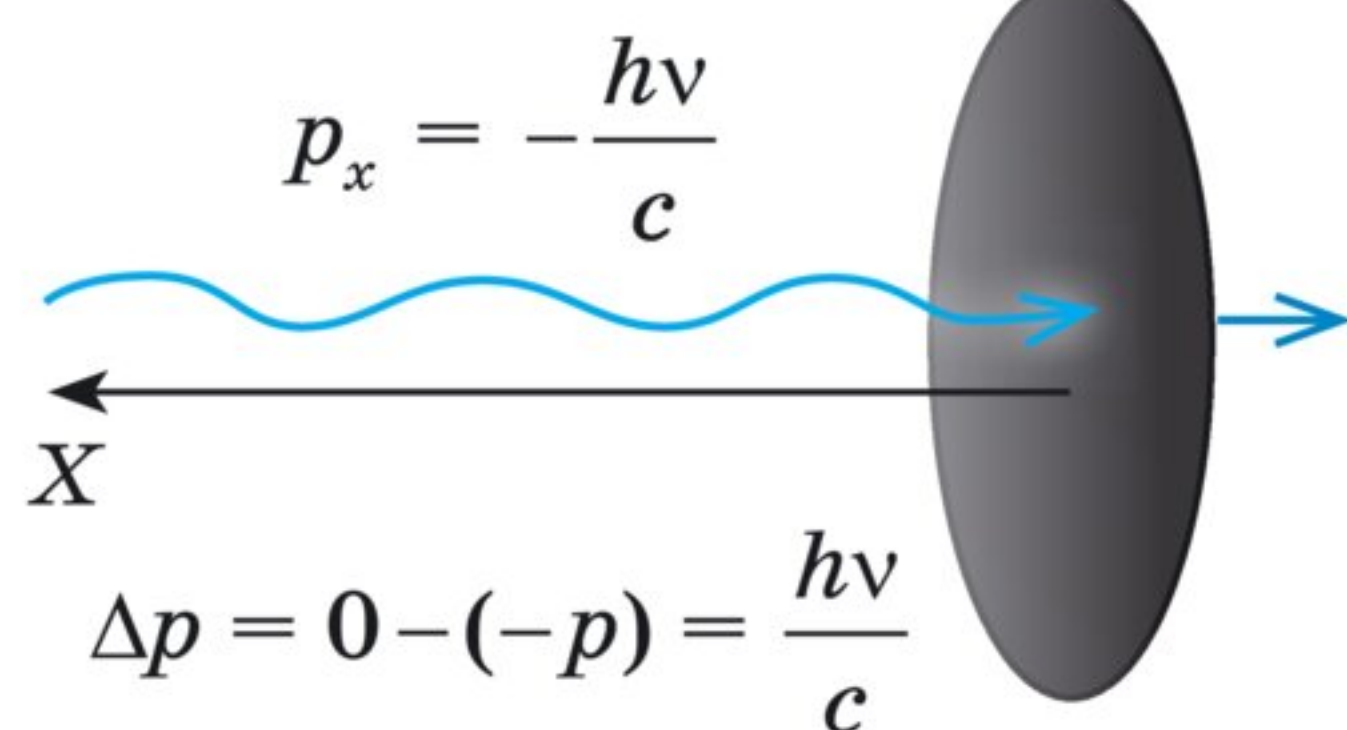
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на уравнение для фотоэффекта.
- Как решать задачи на вычисление давления света.
- Как решать задачи на постулаты Бора.

Зеркальная поверхность



Чёрная поверхность



Электрон-вольт — внесистемная единица энергии, используемая в атомной и ядерной физике, а также в физике элементарных частиц. Один электрон-вольт (1 эВ) — это энергия, которую приобретает электрон, ускоренный в электрическом поле напряжением 1 В. Работа электрического поля по переносу электрического заряда равна $A_{\text{эл}} = qU$. Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Тогда $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 1 Различаются ли давления, оказываемые светом на зеркальную и на чёрную поверхности?

Решение:

Давление равно отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. С другой стороны, согласно второму закону Ньютона, сила воздействия световых квантов на поверхность определяется изменением их импульса в единицу времени. В результате падения фотона на зеркальную поверхность и его последующего отражения изменение импульса кванта будет вдвое превышать изменение импульса по сравнению со случаем падения на чёрную поверхность. Поэтому давление света на зеркальную поверхность вдвое больше его давления на чёрную поверхность.

Ответ: давление света на зеркальную поверхность вдвое больше его давления на чёрную поверхность.

ЗАДАЧА 2 Определите красную границу фотоэффекта для кальция, если работа выхода электронов из этого вещества равна 2,8 эВ. С какой максимальной скоростью вылетают электроны, вырванные из кальция светом с длиной волны $0,5 \cdot 10^{-7}$ м?

Дано:

$$A = 2,8 \text{ эВ}$$

$$\lambda = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\lambda_{\text{max}} = ?$$

$$v_{\text{max}} = ?$$

Решение:

Переведём единицы работы электрон-вольты в джоули:

$$2,8 \text{ эВ} = 2,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4,48 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Красная граница фотоэффекта:

$$v_{\text{min}} = \frac{A}{h} \text{ или } \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A}.$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,48 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 4,44 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$.

Найдём максимальную скорость электронов, учитывая, что

$$v = \frac{c}{\lambda} : v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2hc/\lambda - 2A}{m}}.$$

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} / 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ м} - 2 \cdot 4,48 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Ответ: $\lambda_{\text{max}} = 4,44 \cdot 10^{-7} \text{ м}$; $v_{\text{max}} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.

ЗАДАЧА 3 Мощность солнечного излучения у поверхности Земли, приходящаяся на 1 м^2 , около 1 кВт/м^2 . Оцените число фотонов, падающих каждую секунду на ладонь человека, ориентированную перпендикулярно направлению на Солнце. Считать, что среднее значение длины волны солнечного излучения $0,55 \text{ мкм}$.

Дано:	СИ	Решение:
$I_c = 1 \text{ кВт/м}^2$	1000 Вт/м^2	Среднее значение энергии фотона
$\lambda = 0,55 \text{ мкм}$	$0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	
$S_{\text{л}} = 100 \text{ см}^2$	$0,01 \text{ м}^2$	
$N_{\text{л}} — ?$		$E_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

Если на 1 м^2 поверхности каждую секунду падает N_0 фотонов, то средняя мощность излучения

$$I_{N_0} = N_0 E_{\text{ф}} = N_0 \frac{hc}{\lambda}.$$

Оценку для N_0 получим из равенства $I_{N_0} \approx I_c$:

$$I_c = N_0 \frac{hc}{\lambda} \rightarrow N_0 = \frac{I_c \lambda}{hc}.$$

Число фотонов, падающих на ладонь,

$$N_{\text{л}} = N_0 S_{\text{л}} = \frac{I_c \lambda}{hc} S_{\text{л}} \approx 3 \cdot 10^{19}.$$

Ответ: $N_{\text{л}} \approx 3 \cdot 10^{19}$.

ЗАДАЧА 4 Определите длину волны фотонов, излучаемых атомом водорода при переходе атома из второго стационарного состояния в первое; из третьего стационарного состояния во второе. Какому виду излучения они соответствуют?

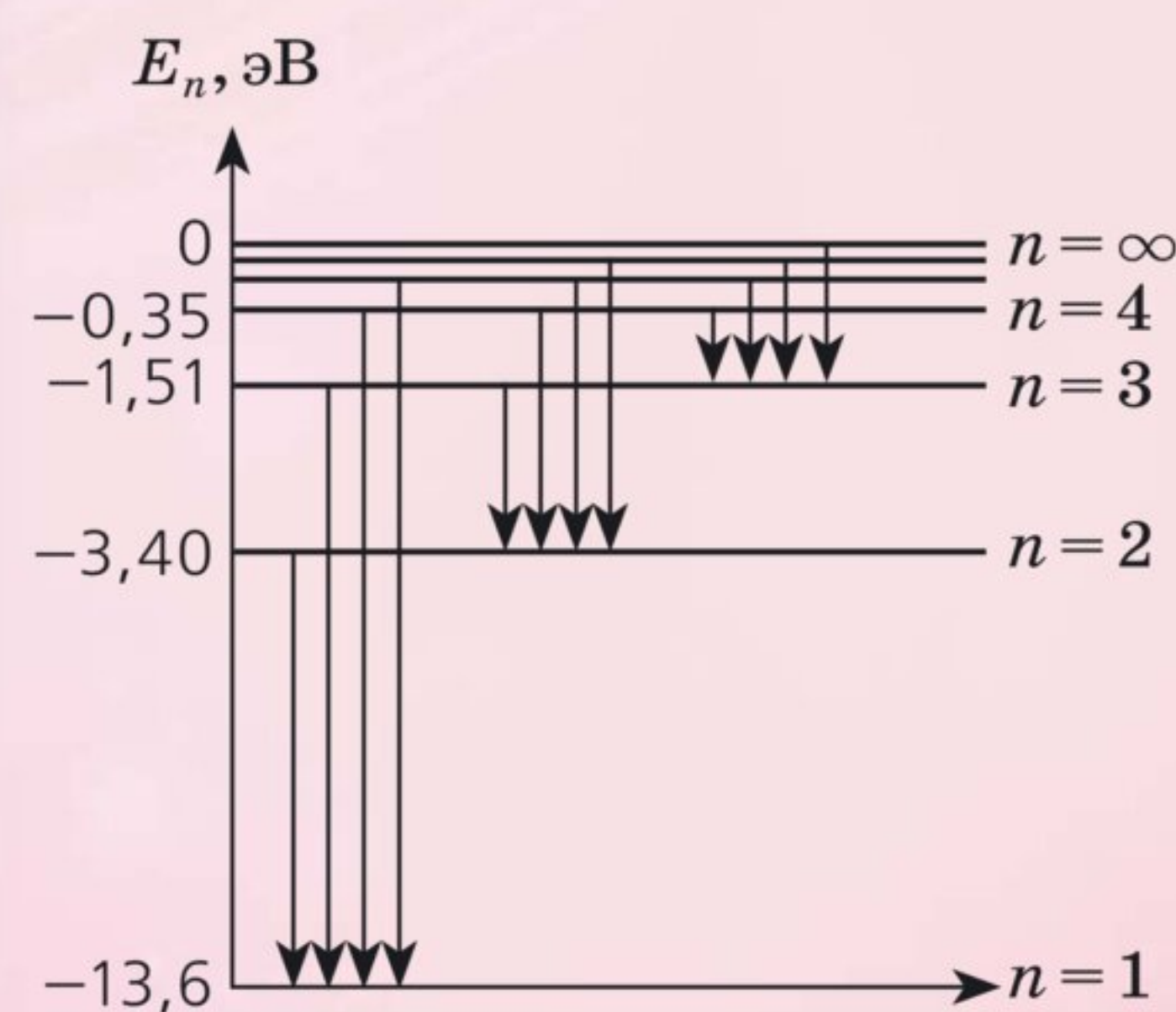
Дано:	Решение:
$E_1 = -13,6 \text{ эВ}$	Переведём единицы работы электрона в джоули:
$E_2 = -3,4 \text{ эВ}$	
$E_3 = -1,51 \text{ эВ}$	
$\lambda_{21} — ?$	$13,6 \text{ эВ} = 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 21,76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$
$\lambda_{32} — ?$	$3,4 \text{ эВ} = 3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5,44 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$
	$1,51 \text{ эВ} = 1,51 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,416 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$

Запишем второй постулат Бора для перехода из второго стационарного состояния в первое: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ — и для перехода из третьего стационарного состояния во второе: $h\nu_{32} = E_3 - E_2$.

Учитывая, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, получим

$$\lambda_{21} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}; \quad \lambda_{32} = \frac{hc}{E_3 - E_2} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: $\lambda_{21} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ — ультрафиолетовое излучение; $\lambda_{32} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ — красный цвет видимого излучения.



КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

ФОТОЭФФЕКТ

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

АТОМ БОРА

$$E = h\nu$$

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Согласно Планку излучение испускается отдельными порциями, или квантами, энергия которых определяется формулой $E = h\nu$.
- Вырывание электронов из вещества под действием света называется фотоэффектом.
- Энергия кванта расходуется на совершение работы выхода, т.е. работы, которую нужно совершить для вырывания электрона из металла, и на сообщение ему кинетической энергии.
- Свету присущ дуализм: он обладает как непрерывными (волновыми), так и дискретными (корпускулярными) свойствами.
- Согласно модели атома Бора электрон в атоме может находиться не на любых орбитах, а лишь на стационарных уровнях, где излучения не происходит. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения.
- Устройства, предназначенные для получения интенсивной электромагнитной волны вследствие вынужденного излучения, называются квантовыми генераторами. Квантовые генераторы видимого света называют лазерами.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

ПОДРОБНЕЕ...

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира. — М.: Аванта+, 2000.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Луч какого лазера — красного или синего — оказывает при одинаковой интенсивности потока фотонов большее давление на поверхность тела?
- Энергия квантов, вызывающих фотоэффект, увеличилась вдвое. Увеличилась ли при этом вдвое кинетическая энергия электронов, вырывааемых из катода?
- Фотон и электрон обладают одинаковой кинетической энергией. Какая из частиц имеет большую длину волны?
- Имеется ли связь между частотой обращения электрона вокруг ядра атома водорода и частотой его излучения?

Справочник по физике
от А до Я
<http://gotourl.ru/13738>

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

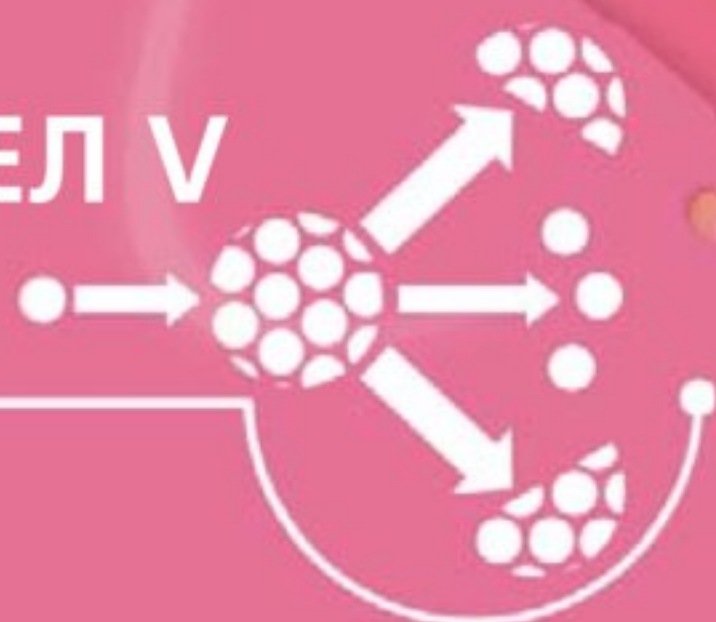


Глава 10

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

- РАДИОАКТИВНОСТЬ
- РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА
- СОСТАВ И СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА
- ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
- ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
- ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
- ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
- ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
- ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ. ДОЗИМЕТРИЯ
- ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ
- ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
- ПРИБОРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ V



КВАНТОВАЯ
ФИЗИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Если бы я мог упомянуть названия всех элементарных частиц, я бы стал ботаником.

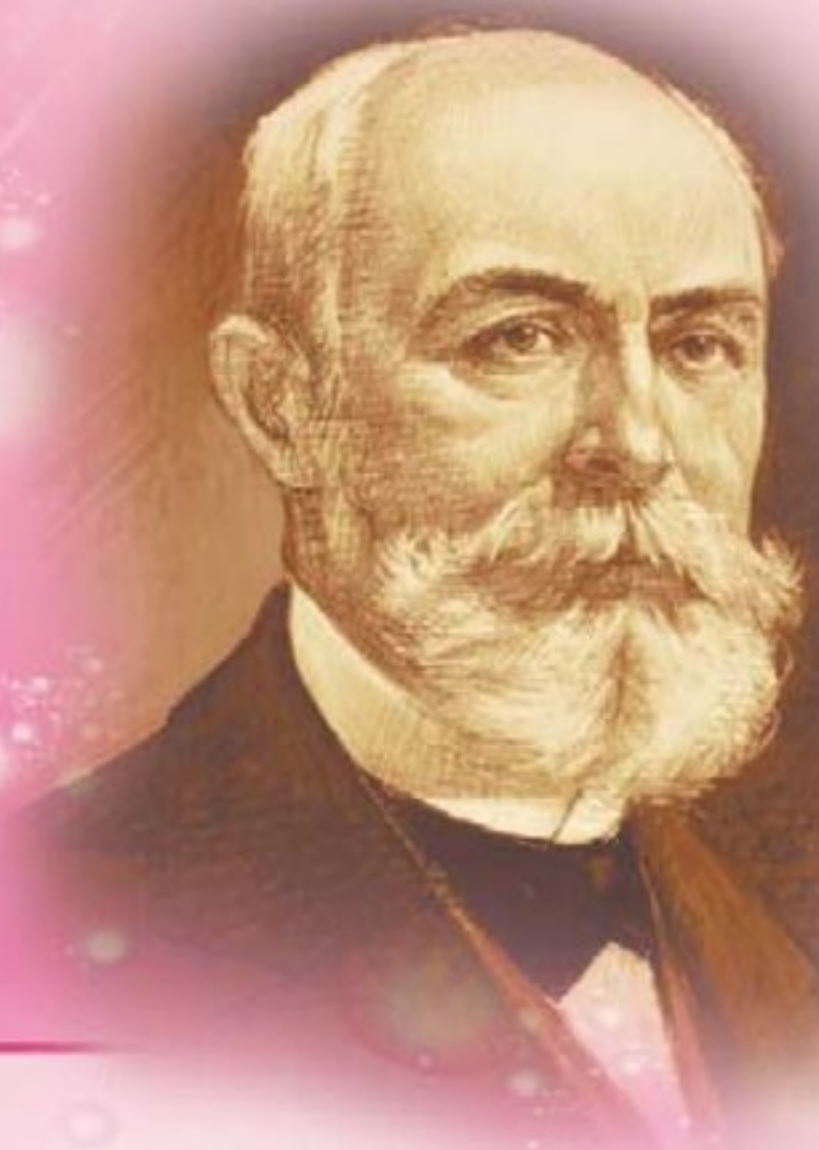
Э. Ферми

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как было открыто явление радиоактивности.
- Какие химические элементы, обладающие радиоактивностью, были открыты на рубеже XIX—XX вв.
- Каков состав радиоактивного излучения.

ВСПОМНИТЕ:

- Каково строение атома?
- Какое влияние оказывает магнитное поле на движущиеся заряженные частицы?
- Какие виды электромагнитного излучения существуют?



Антуан Анри Беккерель
(1852—1908)

Французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первооткрывателей радиоактивности.

При изучении трёх видов излучений выяснилось, что путь α -частиц в воздухе невелик. Они полностью задерживаются листом бумаги. Более проникающим является β -излучение. Оно задерживается цинковой пластинкой толщиной в несколько миллиметров. Самым проникающим излучением являются γ -лучи. Для того чтобы их задержать, нужна либо свинцовая пластина толщиной 5 см, либо 30 см бетона, либо 60 см грунта.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Открытие электрона оказалось важным, но не решающим аргументом, свидетельствующим о сложном строении атома. Практически одновременно с этим открытием было обнаружено явление, которое радикально изменило взгляды учёных на строение материи.

ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ Открытие в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем естественной радиоактивности не только послужило прямым доказательством сложного строения атома, но и говорило о его нестабильности. Это открытие в известной степени было случайным, поскольку на самом деле Беккерель изучал воздействие солнечного излучения на различные соли и минералы.

В частности, Беккерель экспериментировал с солями урана после их облучения Солнцем. Он обнаружил, что уран создавал какое-то проникающее излучение, которое аналогично рентгеновскому вызывало почернение фотопластинки, завёрнутой в плотную чёрную бумагу. Первоначально Беккерель предполагал, что это излучение возникло под влиянием солнечных лучей. Но в один из дней из-за облачной погоды опыт пришлось отложить, и Беккерель убрал пластинку в светонепроницаемый ящик стола, положив на неё медный крест, покрытый солью урана. Несколько дней спустя он на всякий случай проявил фотопластинку и с удивлением обнаружил на ней почернение в виде тени креста. Учёный понял, что соли урана самопроизвольно, без влияния внешних факторов испускают какие-то неизвестные лучи.

Опытным путём Беккерель установил, что излучение солей урана ионизирует воздух и разряжает электроскоп.

ОПЫТЫ КЮРИ Вскоре к исследованиям Беккереля присоединились другие учёные, и прежде всего французские физики супруги Мария и Пьер Кюри. Они понимали, что интенсивное излучение солей урана определяется именно химическим элементом ураном и не зависит от того, в какие другие соединения он входит. Поэтому Кюри приступили к поискам новых химических элементов, обладающих свойствами урана.

В своих первых опытах М. Кюри использовала заряженный электроскоп. Если воздух подвергнуть воздействию излучением, то в результате ионизации молекул он становится проводником, и электроскоп быстро разряжается. Этим свойством излучения и воспользовались учёные для поиска новых радиоактивных элементов. М. Кюри подносила к заряженному электроскопу различные минералы и следила за изменением его состояния.

Таким образом, в 1898 г. был открыт ещё один радиоактивный элемент — торий. В том же году супруги Кюри выделили из урановой смоляной руды два новых химических

элемента — радий и полоний. Для описания подобных явлений М. Кюри был предложен термин «**радиоактивность**». Радиоактивность — это способность ядер некоторых химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с испусканием излучения.

Следует отметить, что радиоактивность радия многократно превышает радиоактивность урана и тория. Например, 1 г радия выделяет за 1 ч количество энергии, достаточное для того, чтобы гирю массой 5 кг поднять на высоту, превышающую 10 м.

СОСТАВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В конце XIX — начале XX в. изучением радиоактивности, кроме А. Беккереля, занимались такие выдающиеся физики, как Э. Резерфорд, М. Кюри и др. Классический опыт по изучению явления радиоактивности состоял из установки, которая представляла собой толстостенный свинцовый ящик с прорезью. Внутри ящика помещались крупинцы радия. Из отверстия в цилиндре выходил направленный пучок радиоактивного излучения в сторону фотопластинки, оставляя на ней тёмное пятно в том месте, куда попадал. Чтобы понять, не является ли радиоактивное излучение потоком заряженных частиц, вся установка помещалась в сильное магнитное поле. Если радиоактивное излучение — это поток заряженных частиц, то он должен отклоняться в ту или иную сторону. Если это поток частиц, не имеющих заряда, то пучок не отклоняется.



После проявления на фотопластинке были обнаружены три пятна: центральное, которое было и раньше, и два дополнительных — по разные стороны от центрального. Отсюда следовало, что в пучке излучения действительно присутствовали частицы, обладающие зарядами противоположных знаков.

Положительно заряженные частицы получили название **альфа-частиц** (α -частицы), а отрицательно заряженные — **бета-частиц** (β -частицы).

Центральный поток, очевидно, представлял собой излучение, не содержащее заряженных частиц. Это излучение было названо **гамма-излучением** (γ -излучение).

Детальные исследования различных физических характеристик этих частиц, в частности электрического заряда и массы, позволили установить, что α -частица — это лишённый обоих электронов атом гелия, т. е. ядро этого атома, а β -частица — это электрон.

Было также установлено, что γ -излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень короткими длинами волн и обладает большой проникающей способностью.

Отметим, что α -, β - и γ -излучения оказались одними из главных инструментов в дальнейшем изучении структуры атома и атомного ядра.



Мария Склодовская—Кюри
(1867—1934)

Выдающийся физик и химик, дважды лауреат Нобелевской премии, занималась исследованием радиоактивности.



Пьер Кюри
(1859—1906)

Французский учёный-физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первых исследователей радиоактивности.

ВОПРОСЫ:

- Ядра каких химических элементов оказываются нестабильными?
- Какие заряженные частицы входят в состав радиоактивного излучения?
- Как α -, β - и γ -излучения различаются по своим проникающим способностям?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что лежит в основе радиоактивных превращений.
- Что такое период полураспада.
- Что выражает и как записывается основной закон радиоактивного распада.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое радиоактивность?
- Какие радиоактивные вещества были открыты на рубеже XIX—XX вв.?
- Каков состав радиоактивного излучения?

Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α -частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью и называемых γ -излучением.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества...

Эрнест Резерфорд

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

После открытия явления радиоактивности и изучения его состава оставалась совершенно непонятной природа самого излучения. На рубеже XIX—XX вв. трудно было даже предположить, что наблюдаемые явления как-то связаны с атомарным строением вещества.

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ Сразу после обнаружения радиоактивности учёные обратили внимание на то, что интенсивность излучения таких элементов, как уран, торий и радий, практически не менялась в течение долгого времени. При этом на характер излучения никак не влияли ни механические воздействия, ни нагревание, ни воздействие света и каких-либо химических реагентов.

Оставалось также непонятным происхождение энергии, выделяющейся при излучении. Было очевидно, что это не может быть связано с энергетическими превращениями на уровне атомов и молекул, которые определяют скорость и направленность химических реакций.

К началу XX в. были получены неопровержимые доказательства того, что все вещества состоят из атомов, которые представлялись мельчайшими и неделимыми частицами вещества. Поэтому даже мысль о том, что радиоактивное излучение может быть связано с превращениями самих атомов, казалась невероятной.

Однако открытие явления радиоактивности и обнаружение у атома ядра позволили учёным высказать предположение, что в результате атомных превращений образуются новые химические элементы, которые по своим свойствам могут радикально отличаться от распавшихся атомов. Например, как обнаружил Резерфорд опытным путём, торий, имеющий порядковый номер 90 в таблице Менделеева, наряду с α -частицами испускает какой-то газ, который также является радиоактивным.

Сотрудник Резерфорда Ф. Содди исследовал химические свойства этого газа и установил, что он не вступает в химические реакции ни с какими другими веществами. Этот тяжёлый инертный газ был впоследствии назван радоном и в таблице Менделеева имеет порядковый номер 86.

Дальнейшие исследования показали, что на самом деле при α -распаде тория первоначально образуется уже упоминавшийся радий, который в результате α -распада и превращается в радон.

Кроме тория и радия, превращения испытывают и другие радиоактивные элементы: полоний, таллий, висмут и др. Например, при β -распаде висмута в результате выброса электрона из ядра его заряд увеличивается на единицу, и висмут превращается в полоний.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА Начиная с исследований Беккереля, супругов Кюри, а также ряда других учёных было установлено, что активность некоторых химических элементов, определяемая как число распадов в единицу времени, с течением времени уменьшается.

Характер зависимости активности радиоактивного вещества от времени был установлен Резерфордом. Этот опытный закон получил название **основного закона радиоактивного распада**. Согласно этому закону для каждого вида радиоактивного вещества существует определённый интервал времени, по истечении которого его активность уменьшается в два раза. Этот временной интервал называется **периодом полураспада**.

Период полураспада $T_{1/2}$ зависит от свойств радиоактивного вещества и характеризует то время, по истечении которого распадается половина имеющегося в наличии числа атомов.

Уменьшение активности радиоактивного образца с течением времени графически изображается плавно спадающей функцией, асимптотически приближающейся к оси абсцисс, на которой отложено время.

Нетрудно получить математическую форму записи закона радиоактивного распада. Если в начальный момент времени $t = 0$ число радиоактивных атомов равно N_0 , то спустя время, равное периоду полураспада, их число будет равно $N_0/2$. Спустя ещё один такой же промежуток времени число атомов окажется равным

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Через время $t = nT_{1/2}$, т. е. по истечении n периодов полураспада, количество оставшихся радиоактивных атомов составит

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Учитывая, что $n = t/T_{1/2}$, получим

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}. \quad (1)$$

Формула (1) и есть математическая форма записи основного закона радиоактивного распада.

С физической точки зрения выражение (1) позволяет судить о скорости радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем больше эта скорость. Например, для радия $T_{1/2} = 1600$ лет, а для урана $T_{1/2} = 4,5$ млрд лет. Следовательно, скорость радиоактивного распада радия существенно больше, чем урана.

На сегодняшний день радий на Земле обнаруживается только потому, что он постоянно возобновляется при радиоактивном распаде тория.

Предсказать, когда произойдёт распад конкретного атома, невозможно. Все атомы, существующие в данный момент, имеют одинаковую вероятность распасться как в этот момент времени, так и в любой последующий. Поэтому любые закономерности, касающиеся радиоактивного распада, применимы только по отношению к большой совокупности атомов. Это означает, что распад атомного ядра всегда происходит случайно.



Если обозначить величины: первоначальное число радиоактивных атомов — N_0 , число этих атомов спустя время t — N , период полураспада атомов данного вида — $T_{1/2}$, то основной закон радиоактивного распада выражается формулой

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}.$$

ВОПРОСЫ:

- Может ли период полураспада радиоактивных атомов зависеть от времени?
- Почему в земной коре с течением времени не убывает количество сравнительно короткоживущих радиоактивных атомов, например радия?
- Может ли закон радиоактивного распада выполняться, например, для 10 радиоактивных атомов?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как был открыт протон.
- Что такое изотопы.
- Как был открыт нейтрон.
- Что такое зарядовое и массовое числа.

ВСПОМНИТЕ:

- В чём заключалась главная цель опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц?
- Что такое радиоактивное излучение?
- Какие частицы входят в состав радиоактивного излучения?
- Какие частицы входят в состав атома?

**Протон**

заряд: $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
масса: $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг

Электрон

заряд: $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
масса: $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

Подавляющее большинство изотопов относится к числу искусственно синтезированных, т. е. полученных в результате различных ядерных превращений. Среди искусственных радиоизотопов более 150 принадлежат к так называемым трансурановым элементам, не встречающимся на Земле. Общее количество изотопов, которые удастся синтезировать в будущем, пока неизвестно. Некоторые теоретические модели, разработанные физиками-ядерщиками, оценивают возможное число атомов, способных к существованию, порядка 6000!

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Знаменитые опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц на тонких металлических мишенях привели в 1911 г. к открытию атомного ядра. Дальнейшие многочисленные эксперименты показали, что атомные ядра, так же как и сами атомы, имеют сложную структуру.

ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА В 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул гипотезу, согласно которой ядро атома водорода представляет собой элементарную частицу, входящую в состав ядер всех химических элементов.

Основанием для такого заключения послужило то обстоятельство, что массы атомов многих химических элементов превышали массу атома водорода практически в целое число раз, т. е. оказались кратны ей.

В 1919 г. Резерфорд и его сотрудники осуществили ряд экспериментов по облучению α -частицами лёгких газов. В частности, при бомбардировке α -частицами атомов азота было обнаружено, что наряду с α -частицами вылетают другие частицы, имеющие точно такие же заряд и массу, как и у ядра атома водорода. Позднее эти частицы Резерфорд назвал **протонами** (от греч. *protos* — первый).

Таким образом, было установлено, что протоны являются структурной частью всех более тяжёлых атомов. Заряд протона является положительным и равным по модулю заряду электрона, т. е. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, однако масса протона оказалась более чем в 1800 раз больше массы электрона.

ИЗОТОПЫ Учёные, исследуя свойства радиоактивных веществ и измеряя массы их атомных ядер, установили, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различающимися по массе ядрами. При этом их радиоактивные свойства оказались различными, а химические свойства — совершенно тождественными. Поэтому в 1911 г. английский физик Ф. Содди, являвшийся сотрудником Резерфорда, предложил эти элементы помещать в одну и ту же ячейку Периодической системы Д.И. Менделеева.

Элементы с одинаковыми химическими свойствами, занимающие одно и то же место в таблице Д.И. Менделеева, получили название **изотопов** (от греч. *isos* — одинаковый, *topos* — место). У изотопов заряды атомных ядер и, следовательно, число электронов в оболочке одинаковы. При этом массы ядер различны и сами ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. В настоящее время известно около 280 стабильных изотопов химических элементов и более 2000 радиоактивных изотопов.

Например, у водорода имеется три природных изотопа с относительными атомными массами 1, 2 и 3. Стабиль-

ный изотоп водорода с атомной массой 2 называется *дейтерием*. Сверхтяжёлый изотоп водорода с атомной массой 3 называется *тритием*. Этот изотоп β -радиоактивен с периодом полураспада 12 лет.

Изотопы обнаружены и у всех тяжёлых химических элементов. Например, существуют радиоактивные изотопы свинца с атомными массами 210, 211, 212 и 214. У самого тяжёлого природного химического элемента — урана также имеется несколько изотопов.

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА Многочисленные эксперименты по измерению масс атомных ядер, включая изотопы, выявили важную закономерность: массы всех ядер оказались кратны массе протона, но не соответствовали числу протонов, содержащихся в этих ядрах. Например, масса ядра атома гелия почти точно равна четырём массам протона. Однако его заряд, определяемый числом протонов, больше заряда протона только в два раза.

Поэтому в 1921 г. Резерфорд выдвинул гипотезу, что атомное ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтральных частиц с массой, близкой к массе протона.

В 1932 г. произошло открытие этих трудно регистрируемых нейтральных частиц, что явилось важнейшим событием для всей ядерной физики. Автором этого открытия стал ученик Резерфорда, английский физик Д. Чедвик. Он обнаружил, что при облучении α -частицами мишени из бериллия возникало излучение, которое без труда пронизывало 20-сантиметровую свинцовую плиту, задерживавшую все другие виды излучений. При облучении парафина это проникающее излучение выбивало из него протоны большой энергии.

Эта новая частица была названа **нейтроном**. Её масса действительно оказалась почти равной массе протона.

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА Сразу после открытия нейтрона и практически одновременно советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра: *ядра всех атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов*.

Количество протонов в ядре называют *зарядовым числом* и обозначают буквой Z . Следовательно, заряд ядра равен Ze , где e — модуль элементарного электрического заряда. Зарядовое число равно номеру химического элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Число нейтронов в ядре обозначают буквой N . Протоны и нейтроны получили общее название — *нуклоны*.

Величину $A = Z + N$, равную общему числу нуклонов в ядре, называют *массовым числом*. Это число, по сути, определяет относительную атомную массу химического элемента.

Ядро тяжёлого изотопа водорода дейтерия состоит из протона и нейтрона. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая тяжёлая вода D_2O , свойства которой заметно отличаются от свойств обычной воды. Например, температура кристаллизации тяжёлой воды равна $3,8^\circ C$, а температура кипения — $101,4^\circ C$. Внешне тяжёлая вода выглядит как обычная — без цвета и запаха. Тяжёлую воду можно выделять из обычной воды либо синтезировать искусственно. В природных водах примесь тяжёлой воды к обычной находится в соотношении 1:5500.

${}^2_1H$
Дейтерий (тяжёлая вода)



${}^3_1H$
Тритий



Масса нейтрона лишь на 0,14% превышает массу протона и равна $1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг. Однако, в отличие от протона, свободный нейтрон не является стабильной частицей. Нейтроны устойчивы лишь в составе стабильных атомных ядер.

ВОПРОСЫ:

- Почему для обнаружения протонов Резерфорд облучал α -частицами именно лёгкие газы, например азот или фтор?
- Почему изотопы обладают одинаковыми химическими свойствами?
- Чем обусловлена высокая проникающая способность нейтронного излучения?
- Что представляет собой протонно-нейтронная модель атомного ядра?

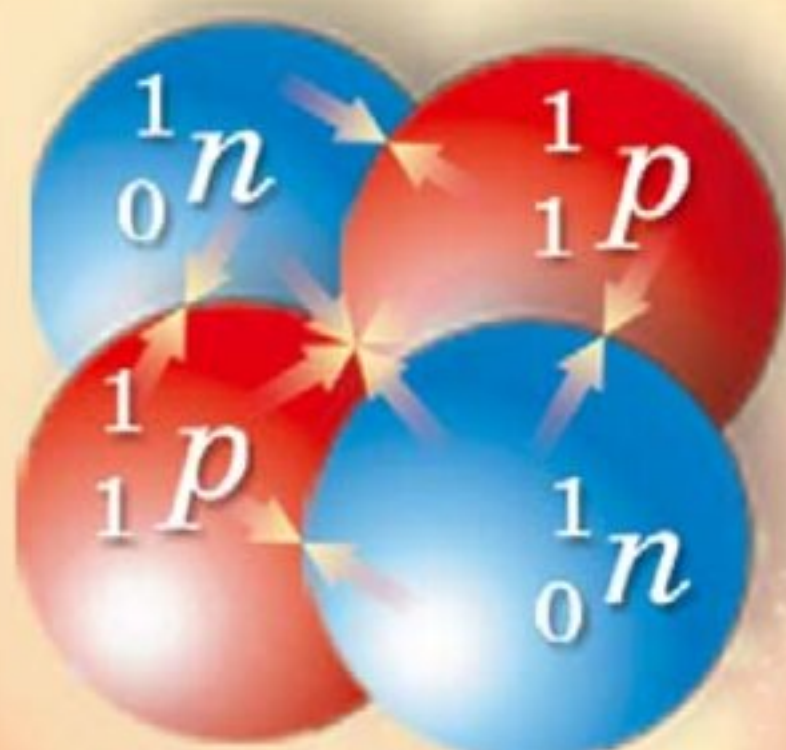
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое ядерные силы.
- Каковы основные особенности ядерных сил.
- Что такое ядерные реакции.
- Как записывают ядерные реакции, описывающие явления естественной радиоактивности.
- Как записывают ядерные реакции, с помощью которых были открыты протон и нейтрон.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие взаимодействия существуют в природе?
- Какие частицы входят в состав атомных ядер?
- Как были открыты протон и нейтрон?

Из-за малого радиуса действия ядерных сил нуклоны осуществляют взаимодействие только с ближайшими соседями. В этом смысле ядро напоминает каплю жидкости, в которой молекулы взаимодействуют лишь с соседними молекулами, а частицы, находящиеся на поверхности капли, стремятся втянуться внутрь, создавая поверхностное натяжение.



ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

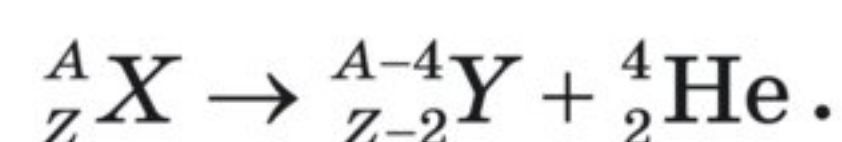
Ядра атомов являются весьма устойчивыми образованиями, хотя в их состав входят одинаково заряженные частицы — протоны. Поскольку размеры ядер очень малы — порядка 10^{-15} — 10^{-14} м, между протонами в ядрах существуют огромные силы электрического отталкивания. Поэтому удерживать в столь малом объёме ядра одноимённо заряженные частицы могут только очень большие силы притяжения между нуклонами.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ И ИХ СВОЙСТВА Гравитационное взаимодействие не может играть стабилизирующую роль в ядрах, поскольку это взаимодействие пренебрежимо мало по сравнению с силами кулоновского отталкивания между протонами. Это означает, что между ядерными частицами действуют силы особой природы, радикально отличающиеся от гравитационных и электромагнитных сил. Эти силы называют **ядерными**.

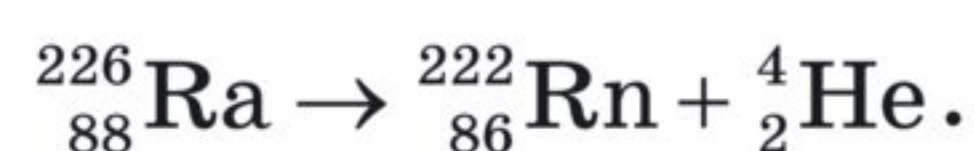
Ядерные силы очень велики: на расстояниях, сравнимых с размерами самих нуклонов, эти силы примерно на два порядка больше электромагнитных сил. Кроме того, ядерные силы являются весьма короткодействующими и очень быстро убывают с увеличением расстояния между ядерными частицами: на расстоянии 10^{-14} м их действием можно пренебречь.

Особый характер ядерных сил проявляется также в том, что они не зависят от того, является ли нуклон заряженным или нет: два протона взаимодействуют друг с другом так же, как протон с нейтроном или нейтрон с нейтроном (зарядовая независимость ядерных сил).

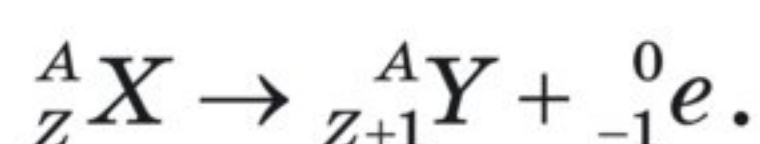
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ Характер взаимодействия между нуклонами в ядрах тесно связан с процессами превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов. Такие превращения называют **ядерными реакциями**. Первыми примерами ядерных реакций могут служить явления естественной радиоактивности. Ядерная реакция, описывающая α -распад, показывает, как в этой реакции изменяются массовое и зарядовое числа ядра. Если ядро нуклида X испытывает α -распад и превращается в ядро нуклида Y , то соответствующее уравнение можно записать в виде



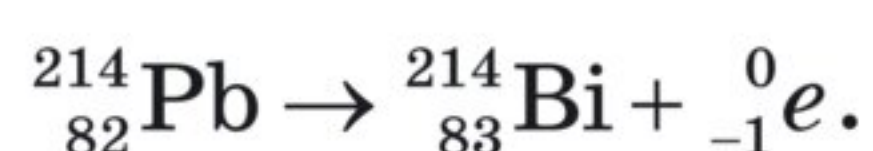
Как видно из уравнения, при α -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на две ячейки ближе к началу таблицы Менделеева. Например, в результате α -распада радия образуется ядро радона:



Поскольку β -распад сопровождается вылетом электрона и общее число нуклонов в ядре не изменяется, то массовое число ядра остаётся прежним, но его заряд увеличивается на единицу:

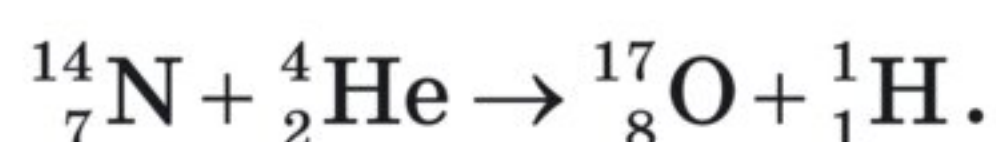


Таким образом, при β -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который размещается на одну клетку дальше от начала таблицы Менделеева. В качестве примера приведём уравнение β -распада радиоактивного изотопа свинца ${}_{82}^{214}\text{Pb}$:



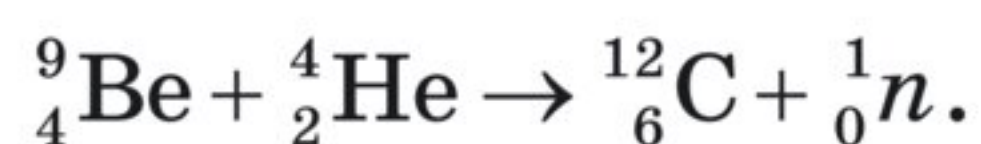
Наиболее многочисленный класс ядерных реакций образуют превращения атомных ядер в случае, когда ядерным частицам сообщается большая кинетическая энергия. Это необходимо для того, чтобы одноимённо заряженные частицы или ядра достаточно сблизилась и попали в сферу действия ядерных сил.

Самой первой искусственной ядерной реакцией была реакция по обнаружению протона, о чём уже говорилось ранее. При бомбардировке ядер азота ${}_{7}^{12}\text{N}$ быстрыми α -частицами Резерфорд, по сути дела, осуществил превращение ядра азота в ядро изотопа кислорода:



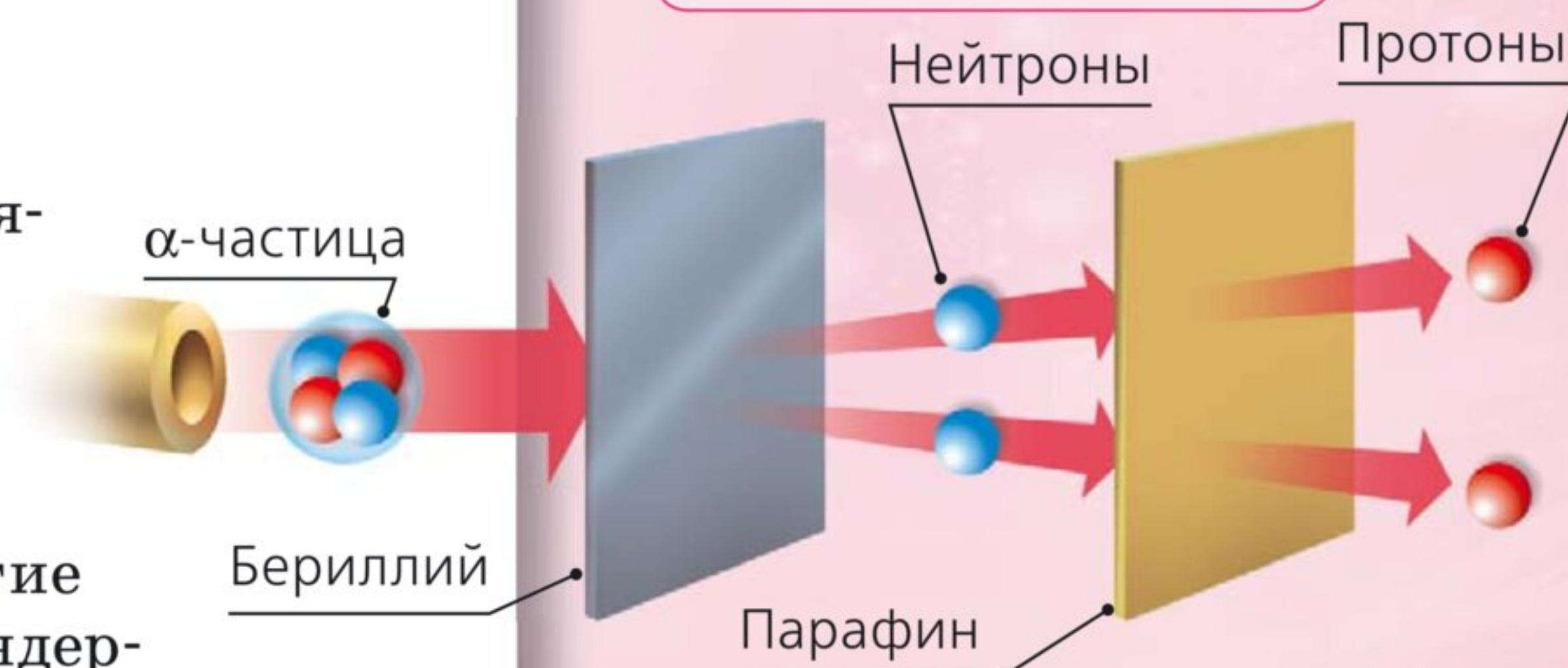
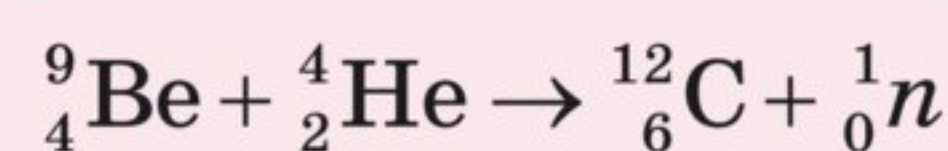
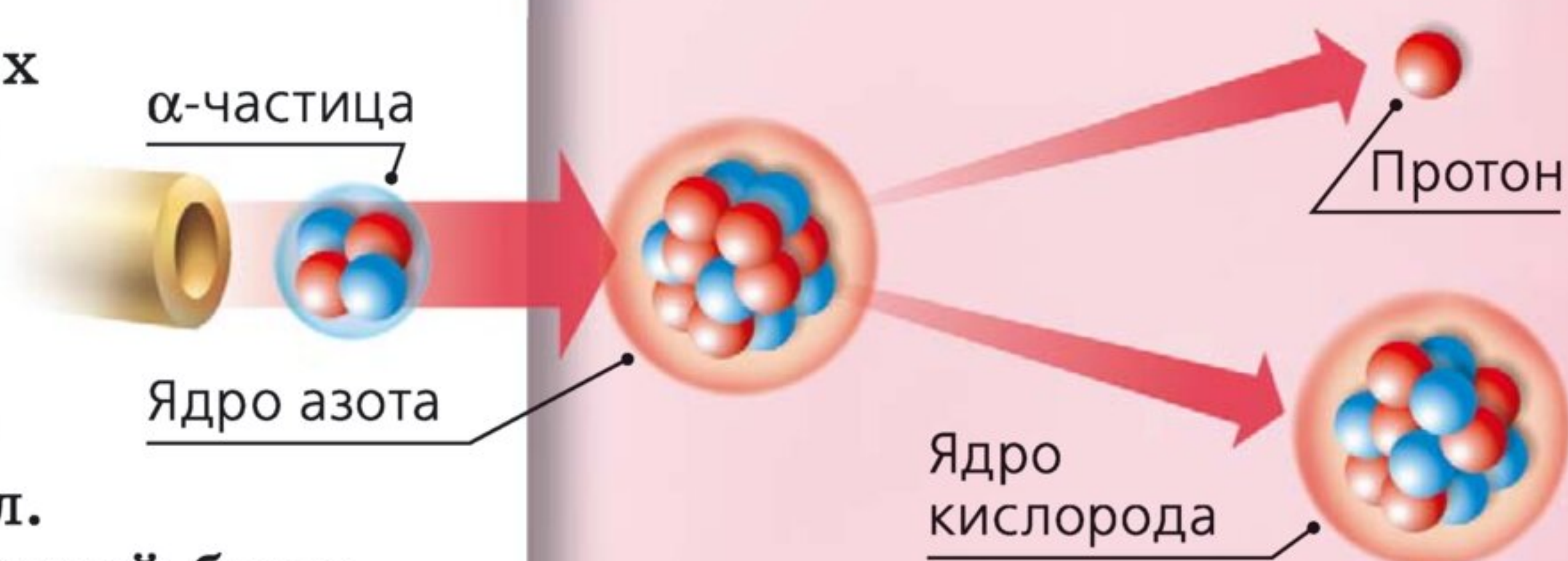
Превращения одних ядер в другие под влиянием α -частиц были обнаружены также для фтора, натрия, алюминия и ряда других лёгких ядер.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С НЕЙТРОНАМИ Открытие нейтрона явилось важнейшим событием для ядерной физики. Первая ядерная реакция по обнаружению нейтронов, как известно, была осуществлена при бомбардировке α -частицами ядер бериллия:



При этом образовывался стабильный изотоп углерода ${}_{6}^{12}\text{C}$ и нейтрон ${}_0^1n$, символическое обозначение которого означает, что его заряд равен нулю, а относительная атомная масса близка к единице. Поскольку нейтрон не обладает зарядом, он может практически беспрепятственно проникать в атомные ядра. По этой причине нейтрон является уникальным инструментом для осуществления различных ядерных реакций. Особенно эффективно взаимодействуют с ядрами так называемые медленные нейтроны, скорости которых сопоставимы со скоростями теплового движения молекул газов.

При осуществлении ядерных реакций выполняются законы сохранения электрического заряда, полного числа нуклонов, а также энергии и импульса. Например, в реакции расщепления ядра азота α -частицей сохраняются электрический заряд ($2 + 7 = 8 + 1$) и число нуклонов ($14 + 4 = 17 + 1$).



ВОПРОСЫ:

- Как соотносится ядерное взаимодействие с другими видами взаимодействий в природе?
- Какие законы сохранения выполняются при ядерных реакциях?
- Почему нейтроны являются очень удобными частицами для осуществления ядерных реакций?
- Почему для осуществления ядерных реакций с заряженными ядерными частицами последние должны обладать большой кинетической энергией?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое энергия связи.
- Что такое дефект массы.
- Что такое удельная энергия связи ядер.
- Какие энергетические превращения происходят при ядерных реакциях.

ВСПОМНИТЕ:

- Из каких частиц состоят атомные ядра?
- В чём заключается взаимосвязь массы и энергии?
- Что такое ядерная реакция?
- Что такое изотопы?

	Водород	Дейтерий	Гелий
Число протонов в ядре	1	1	2
Число нуклонов в ядре	1	2	4
Энергия связи ядра, Дж	0	$3,5 \times 10^{-13}$	$4,5 \times 10^{-12}$

Значения энергии связи ядер

Первым, кто предположил, за счёт какой энергии обеспечивается устойчивость атомных ядер, был американский физик У. Харкинс, который ввёл в ядерную физику термин «дефект массы».

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Устойчивость атомных ядер, а также энергетические превращения при ядерных реакциях зависят как от характера взаимодействия между отдельными нуклонами, так и от такой важной физической величины, как энергия связи ядра.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

На самом деле с понятием энергии связи мы сталкиваемся при изучении самых разных разделов физики. Энергию связи можно понимать как работу, которую нужно совершить, чтобы развести взаимодействующие тела на такое расстояние, когда их взаимодействием можно пренебречь. Энергия связи обеспечивает устойчивость таких непохожих систем, как планетные системы, молекулы и их образования, атомы, а также атомные ядра.

По определению, **энергией связи ядра** называют ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны.

Ввиду сложного характера взаимодействия между нуклонами пока не удаётся рассчитать энергию связи ядер теоретически. Однако эта энергия может быть найдена путём измерения масс ядер.

Действительно, как показали точные измерения, масса ядра всегда меньше суммы масс слагающих его протонов и нейтронов. Поэтому при слиянии свободных протонов и нейтронов в ядро должна выделяться энергия в виде излучения γ -квантов. Это следует из взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2$, которая была открыта А. Эйнштейном в 1905 г.

Поскольку сумма масс покоя свободных нуклонов превышает массу покоя ядра $M_{\text{я}}$, то разность масс

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}} \quad (1)$$

положительна. Эта разность масс получила название **дефекта массы**.

Наличие положительного дефекта массы означает, что совокупная энергия Z протонов и N нейтронов на значение энергии связи $E_{\text{св}}$ превышает энергию ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2. \quad (2)$$

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

Энергию связи, приходящуюся на один нуклон, называют **удельной энергией связи**. Эту характеристику ядра необходимо знать для расчёта энергетических превращений в ядерных реакциях.

Удельная энергия связи экспериментально определена для многих массовых чисел. Согласно экспериментальным данным для большинства ядер удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. При

этом кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа имеет весьма нерегулярный ход в области лёгких ядер и слабо выраженный максимум в области ядер с массовыми числами от 50 до 60 (железо и ядра с близким к нему числом протонов).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Как уже отмечалось ранее, ядерные реакции происходят тогда, когда частицы приближаются к ядру настолько, что попадают в сферу действия ядерных сил. Для заряженных частиц, например протонов, это возможно только при условии, если им сообщена большая кинетическая энергия.

Одна из первых ядерных реакций на быстрых протонах, результатом которой было расщепление ядра лития с образованием двух α -частиц, была осуществлена в 1932 г.:



В этой реакции суммарная кинетическая энергия ядер гелия больше кинетической энергии протона примерно на $1,2 \cdot 10^{-12}$ Дж. Положительный энергетический выход реакции обусловлен изменением внутренней энергии ядер, участвующих в реакции. Это изменение внутренней энергии объясняется тем фактом, что удельная энергия связи ядер гелия оказывается больше удельной энергии связи ядер лития. Поэтому некоторая часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию α -частиц.

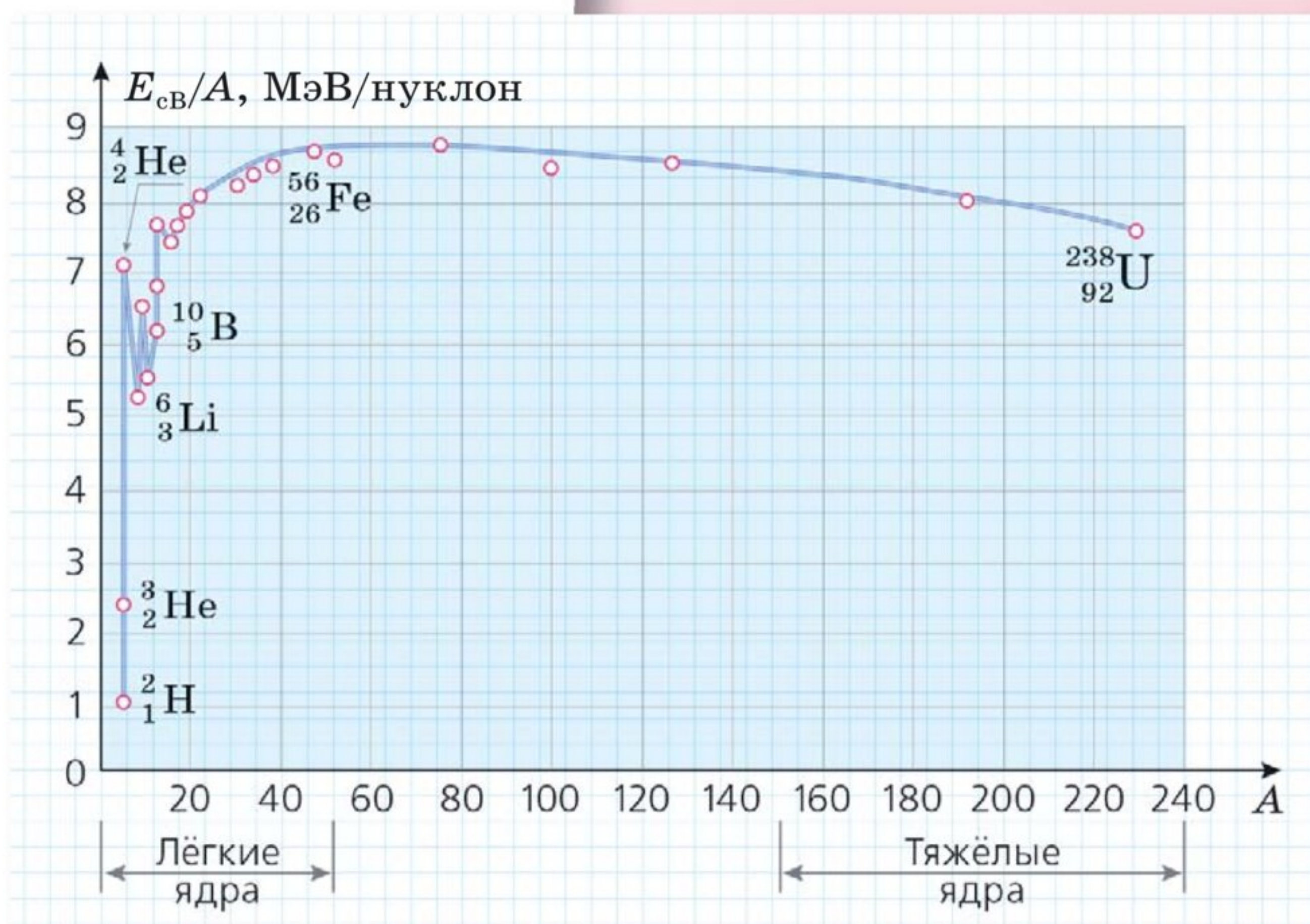
На основании закона сохранения энергии можно утверждать, что энергия в ядерных реакциях выделяется тогда, когда внутренняя энергия ядер—продуктов реакции уменьшается. При этом, очевидно, суммарная энергия покоя частиц и ядер, участвующих в реакции, также претерпевает изменение.

В реакции (3) расщепления лития разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции оказывается положительной и равной энергетическому выходу реакции.

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции оказывается меньше, чем до реакции, то реакция идёт с поглощением энергии.

Например, упоминавшаяся ранее реакция взаимодействия α -частиц с ядрами азота сопровождается поглощением энергии. В этой реакции часть кинетической энергии α -частицы переходит во внутреннюю энергию образовавшегося ядра изотопа кислорода.

После осуществления первых ядерных реакций стала понятной причина неудач алхимиков в попытках превратить один химический элемент в другой, т. е. фактически преобразовать ядра атомов: энергия связи в ядрах в миллионы раз превышает энергию связи атомов и молекул между собой.



Резерфорд, являющийся одним из творцов атомной и ядерной физики, до конца своей жизни категорически отрицал возможность использования ядерных реакций для практических целей.

ВОПРОСЫ:

- Как связана энергия связи ядра с его дефектом масс?
- Почему ядра в области массовых чисел $A \sim 60-100$ оказываются наиболее устойчивыми?
- Какие превращения энергии происходят при ядерных реакциях?
- На чём основан расчёт энергии, выделяющейся в ядерных реакциях?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие частицы и ядра образуются при делении ядер урана.
- Как осуществляется сам процесс деления ядра.
- Что такое цепные ядерные реакции деления.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ядерные реакции?
- В чём заключается особенность ядерных реакций с участием нейтронов?
- Какие силы действуют внутри атомных ядер?

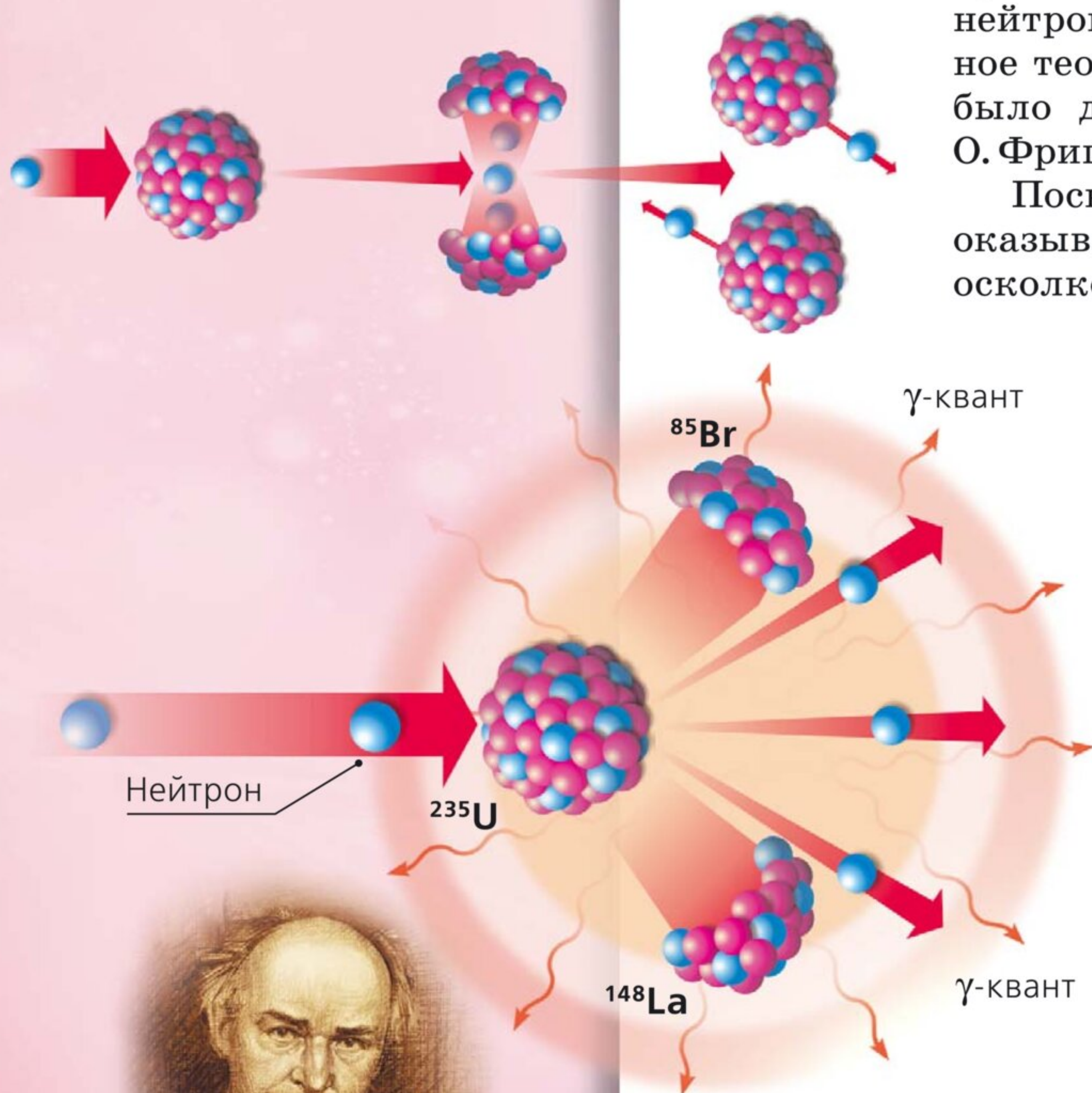
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Деление тяжёлых ядер на средние по массовому числу ядра оказалось возможным потому, что новые ядра-осколки образуются в состояниях с минимальным запасом внутренней энергии.

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА В 1938 г. немецкие учёные О. Ган и Ф. Штрассман сделали открытие, последствия которого коренным образом изменили всё будущее развитие человеческой цивилизации. Суть этого открытия заключалась в обнаружении деления ядер изотопа урана ^{235}U при их бомбардировке нейтронами. Было установлено, что в результате таких реакций деления возникают элементы средней части Периодической системы (барий, лантан, криптон и др.), а также вылетают два-три нейтрона на каждый акт деления. Правильное теоретическое объяснение этого деления было дано в 1939 г. другими физиками: О. Фришем и Л. Мейтнер.

Поскольку масса покоя делящегося ядра оказывается больше суммы масс покоя ядер-осколков, то при делении должно происходить выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя.

Такой же вывод следует из анализа удельной энергии связи ядер атомов. Действительно, для ядер с массовыми числами $A \approx 100$ удельная энергия связи примерно на 1 МэВ/нуклон превышает удельную энергию связи тяжёлых ядер с $A \geq 200$. Поэтому при делении ядра урана общее увеличение энергии связи превышает 200 МэВ, в результате чего на каждый единичный акт деления выделяется огромная энергия — порядка $3,2 \cdot 10^{-11}$ Дж. Эта энергия в десятки миллионов раз превосходит энергию химических превращений и представляет собой кинетическую энергию ядер-осколков, нейтронов и γ -квантов.



Фриц Штрассман
(1902—1980)

Немецкий физик и химик, изучал процессы ядерного деления.



Советскими учёными К. А. Петржаком и Г. Н. Флёровым в 1940 г. было установлено, что уран способен делиться и без внешнего воздействия, т. е. самопроизвольно. Для ядер атомов урана самопроизвольное деление — это редкий процесс. Например, в 1 г урана происходит около 20 таких делений в час.

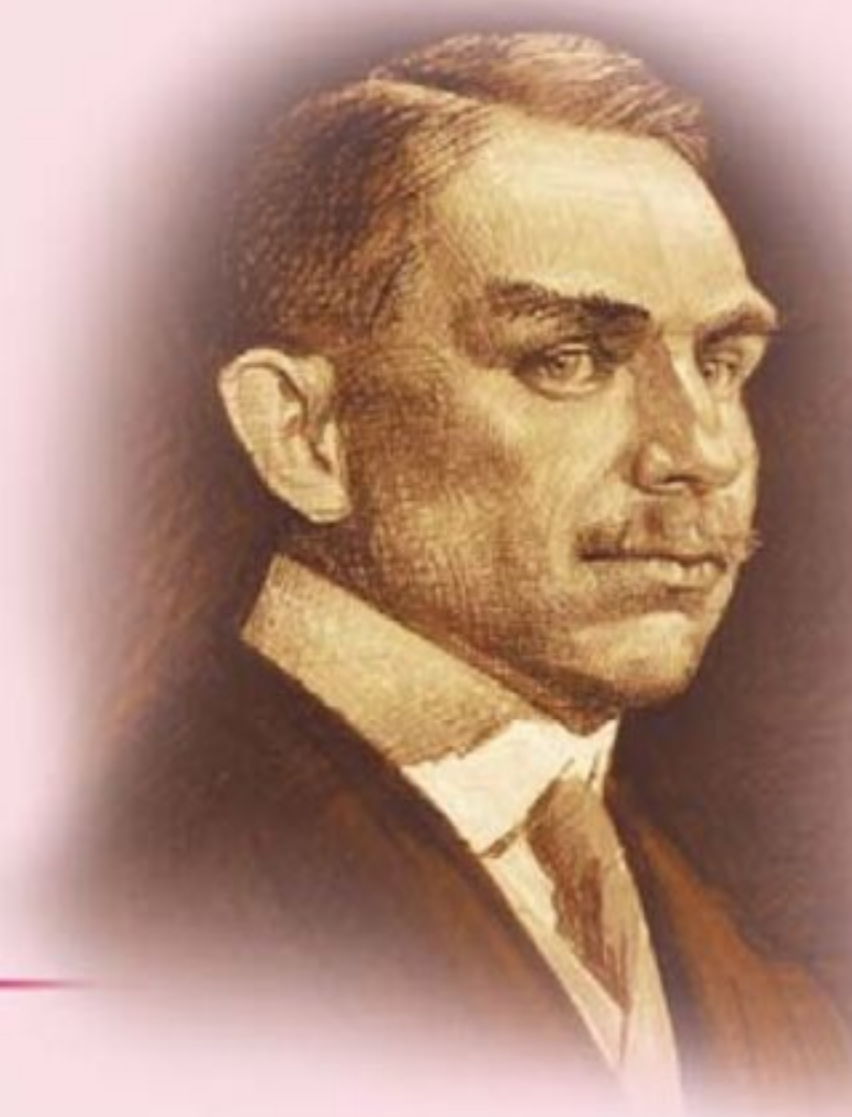
Чтобы понять, почему ядро урана под действием нейтронов начинает делиться, представим себе ядро атома в виде жидкой капли. Нейтрон, попадая в ядро, сообщает ему дополнительную энергию, и ядро начинает колебаться. В ядре, помимо ядерных сил, действуют и силы электростатического отталкивания между протонами. При колебаниях ядро деформируется, приобретая вытянутую форму. При этом нуклоны, принадлежащие двум половинкам вытянутого ядра, удаляются друг от друга на расстояние, на котором силы кулоновского отталкивания начинают преобладать над ядерными силами притяжения. Это приводит к образованию перешейка, соединяющего части деформированного ядра, после чего оно разрывается на два ядра-осколка. Под действием мощных сил кулоновского отталкивания эти осколки разлетаются с огромными скоростями.

Одним из главных факторов, связанных с делением, является испускание двух-трёх нейтронов на каждый акт деления ядра. Это обстоятельство сыграло решающую роль в практическом использовании внутриядерной энергии. Причина испускания нейтронов при делении ядра состоит в том, что возникающие в процессе деления осколки оказываются «перегружены» нейтронами, т. е. относительное число нейтронов оказывается большим, чем это характерно для ядер, находящихся в середине Периодической системы. Поэтому ядра-осколки освобождаются от нескольких нейтронов и превращаются в стабильные изотопы.

ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ При работе крупной ядерной установки одновременно делится очень большое число ядер урана. Но где взять необходимое для такого деления число нейтронов? Эти нейтроны предоставляет сам уран. Испущенные в результате первого деления нейтроны попадают в другие ядра урана, вызывая новые деления. Это приводит к высвобождению дополнительных нейтронов, которые также принимают участие в делении ядер. После каждого деления увеличивается число нейтронов и происходит всё больше делений. Число делящихся ядер увеличивается очень быстро, и такой процесс называют **цепной реакцией деления**.

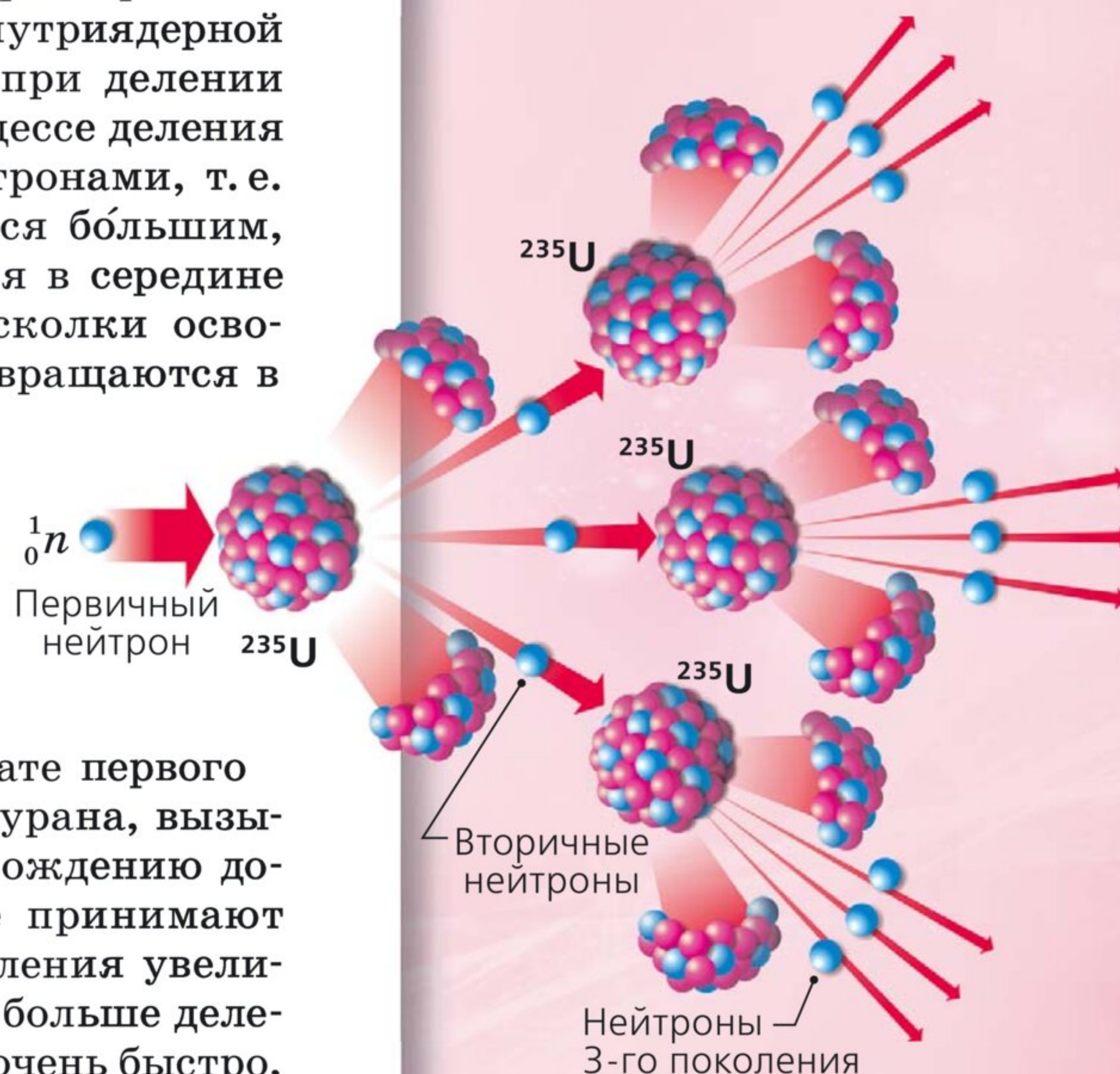
Для того чтобы цепная реакция стала самоподдерживающейся, вовсе не обязательно, чтобы каждый нейтрон вызывал деление ядра. Обязательным является лишь условие, чтобы среднее число освобождающихся нейтронов не убывало с течением времени. Если же это условие не выполняется, то цепной процесс быстро гаснет.

Впервые управляемый цепной процесс деления ядер урана был осуществлён в 1942 г. в США под руководством выдающегося итальянского физика Э. Ферми. Для этих целей используются устройства, называемые ядерными (атомными) реакторами.



Отто Ган
(1879—1968)

Немецкий химик, лауреат Нобелевской премии по химии. Изучал расщепление урана.



ВОПРОСЫ:

- За счёт чего выделяется энергия при делении ядер урана?
- Почему при делении ядра урана происходит испускание в среднем двух-трёх нейтронов?
- При каком условии цепной процесс деления ядер будет самоподдерживающимся?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как можно использовать энергию атомного ядра.
- Как устроен ядерный реактор.
- Каковы преимущества и недостатки атомной энергетики.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ядерные реакции деления?
- Какую роль играют нейтроны в реакциях деления ядер?
- Что такое цепные реакции деления?

Первый ядерный реактор был запущен в СССР в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова.

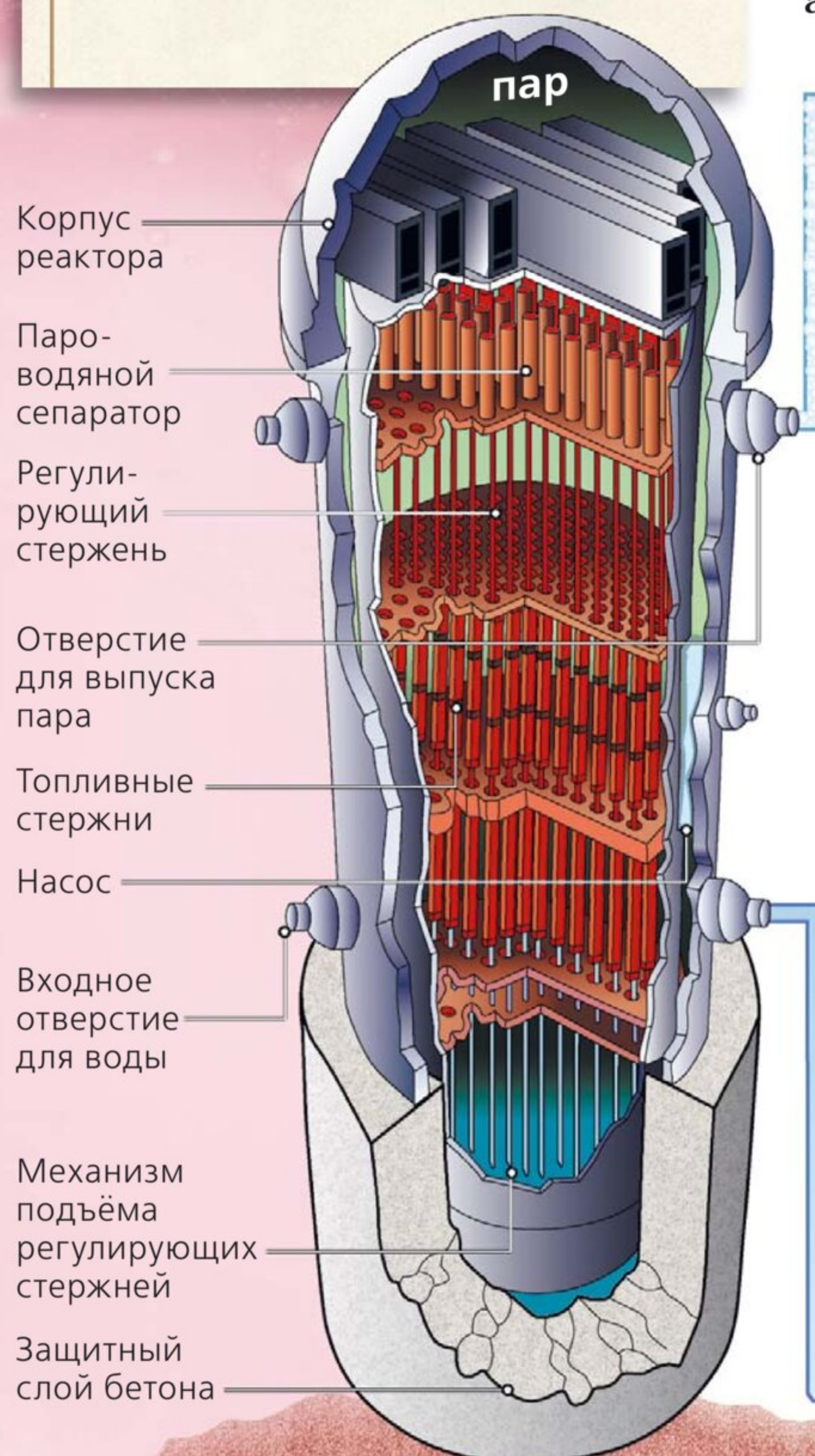
ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Как известно, потребности человечества в энергии постоянно растут. При этом основную долю энергии люди получают путём сжигания невозобновляемых запасов природного топлива в виде угля, нефти, газа и т.п. Поэтому важное место в жизни общества занимает поиск альтернативных способов получения энергии.

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР Открытие деления тяжёлых ядер привело к возникновению и развитию атомной энергетики, основанной на использовании энергии, запасённой внутри ядра атома. Процесс развития управляемых цепных ядерных реакций и их контроль осуществляются в установках, называемых **ядерными реакторами**.

Главную часть реактора называют *активной зоной*. В активной зоне расположены тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), имеющие трубчатую форму и содержащие ядерное топливо.

Топливо для реактора представляет собой таблетки, состоящие из оксида урана-235. Топливо в реакторах работает от 3 до 5 лет, после чего ТВЭЛы извлекают из активной зоны и заменяют на новые.



Чтобы ядерное топливо использовалось максимально эффективно, в активную зону реактора помещают *замедлители*, которые замедляют нейтроны, образующиеся при делении ядер. Это обусловлено тем, что ядра урана-235 с большой вероятностью делятся под действием медленных нейтронов, энергия которых меньше, чем энергия нейтронов деления. В качестве замедлителей в реакторах обычно используют тяжёлую воду или чистый графит. Эти вещества эффективно замедляют нейтроны, не поглощая их.

Снаружи активная зона реактора окружена *отражателем нейтронов*, представляющим собой оболочку, изготовленную из бериллия. Наличие отражателя не позволяет нейтронам покидать активную зону, что увеличивает вероятность деления ядер.

Для нормальной работы реактора необходимо, чтобы ядерная цепная реакция протекала стационарно. Это возможно только при строгом постоянстве во времени числа нейтронов, образующихся в процессе деления. Если их число по тем или иным причинам начнёт увеличиваться, это приведёт к резкому росту энерговыделения, что чревато взрывом реактора. Если число нейтронов

насос

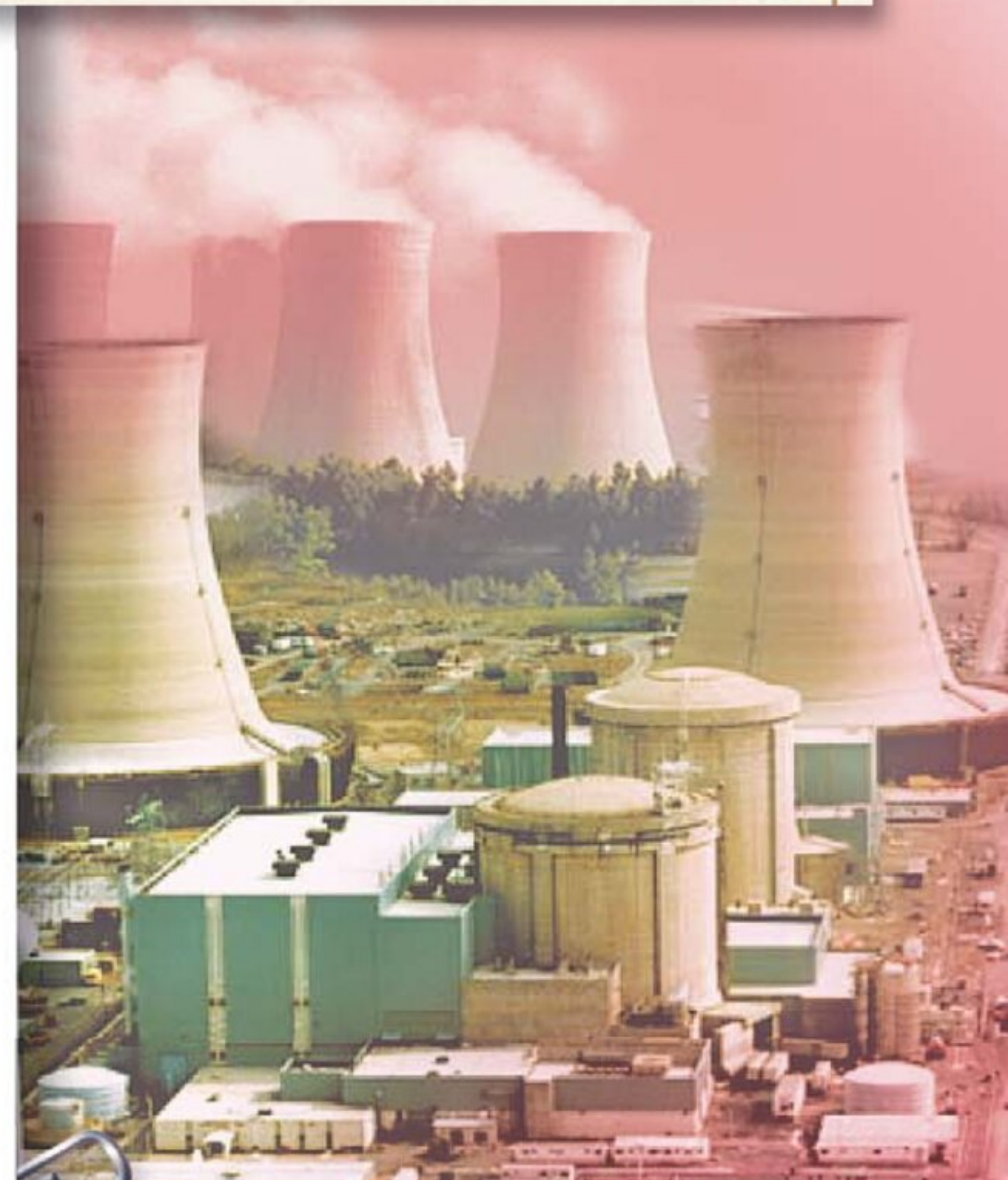
будет уменьшаться, то реакция деления быстро загаснет. Поэтому для управления цепной реакцией в реакторе предусмотрены так называемые *регулирующие стержни*, которые состоят из материалов, активно поглощающих нейтроны. Как правило, это соединения кадмия или бора. Для того чтобы остановить цепную реакцию, регулирующие стержни полностью вводят в активную зону реактора. Чтобы реактор запустить заново, стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнётся цепная реакция деления ядер урана.

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ Принцип работы атомной электростанции практически ничем не отличается от принципа работы обычной тепловой электростанции. Тепло, выделяющееся в активной зоне реактора, отводится теплоносителем, например водой. Теплоноситель поступает в парогенератор, в котором вода превращается в пар под высоким давлением. Затем пар подаётся на турбину, соединённую с генератором электроэнергии. Отработанный пар превращается в воду в конденсаторе, откуда вода снова поступает в парогенератор.

На АЭС циркуляции теплоносителя и пара осуществляются по замкнутым контурам, что важно с точки зрения обеспечения радиационной безопасности.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ Преимуществом ядерной энергетики по сравнению с тепловыми электростанциями является отсутствие вредных выбросов в атмосферу при работе реактора. АЭС не потребляют атмосферный кислород и позволяют в перспективе решить проблему ограниченного запаса природного топлива. При этом производимая энергия оказывается значительно дешевле энергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях. Вместе с тем в атомной энергетике есть и свои проблемы. Очень серьёзными проблемами являются хранение и переработка радиоактивных отходов. К сожалению, на сегодняшний день не существует абсолютно безопасных методов захоронения ядерных отходов и предотвращения их попадания в окружающую среду.

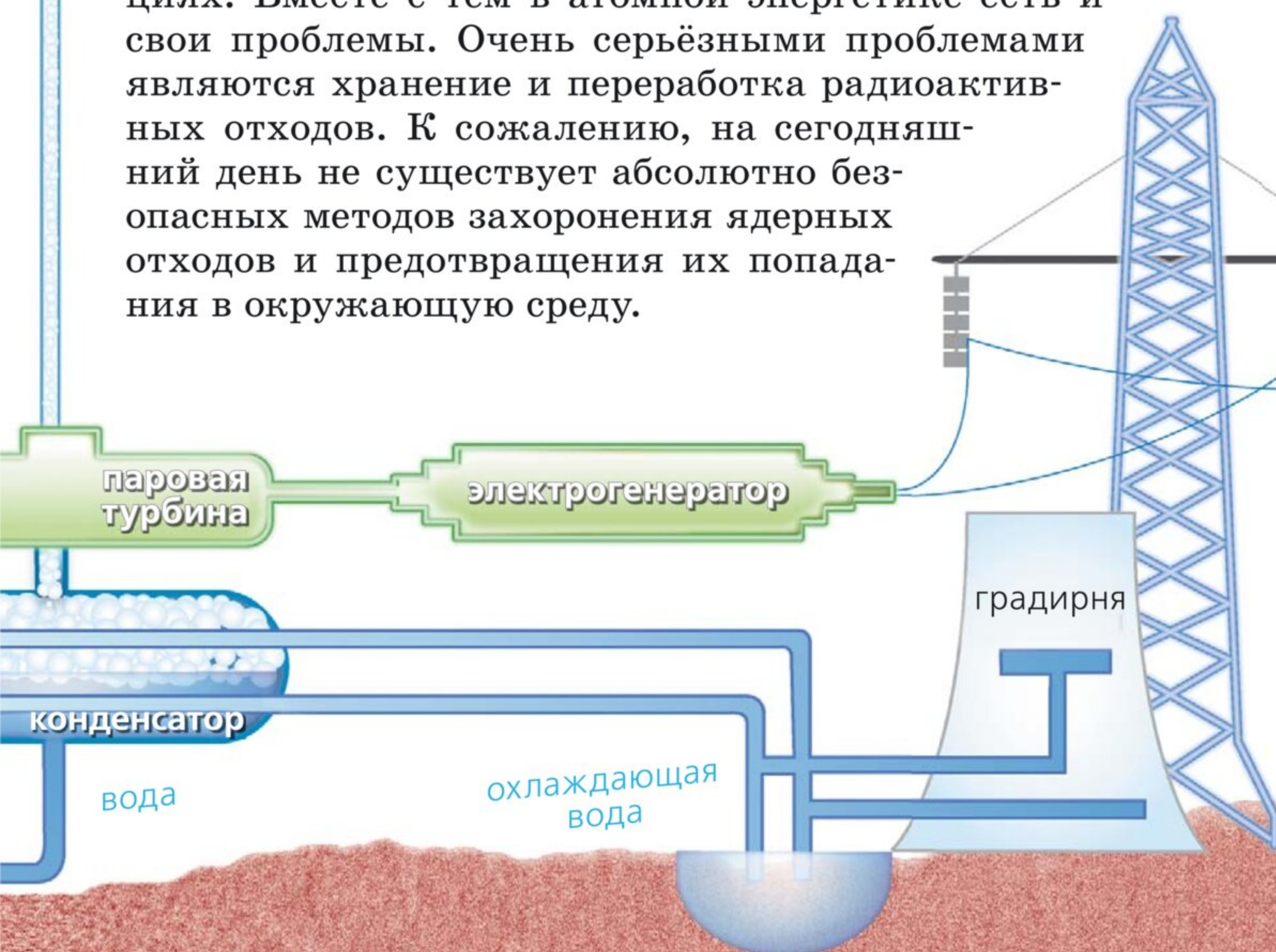
При делении 1 кг урана-235 выделяется энергия, которую можно получить при сжигании 3000 т каменного угля, это примерная масса железнодорожного состава из 60 вагонов.



В настоящее время построены реакторы, работающие на быстрых нейтронах, т.е. без замедлителя. Эти реакторы называют реакторами-размножителями, поскольку при их работе в активной зоне образуется ядерное топливо — плутоний.

ВОПРОСЫ:

- При каком условии режим работы ядерного реактора является стационарным?
- Зачем в ядерном реакторе используют замедлители и поглотители нейтронов?
- Каковы преимущества АЭС по сравнению с тепловыми электростанциями?



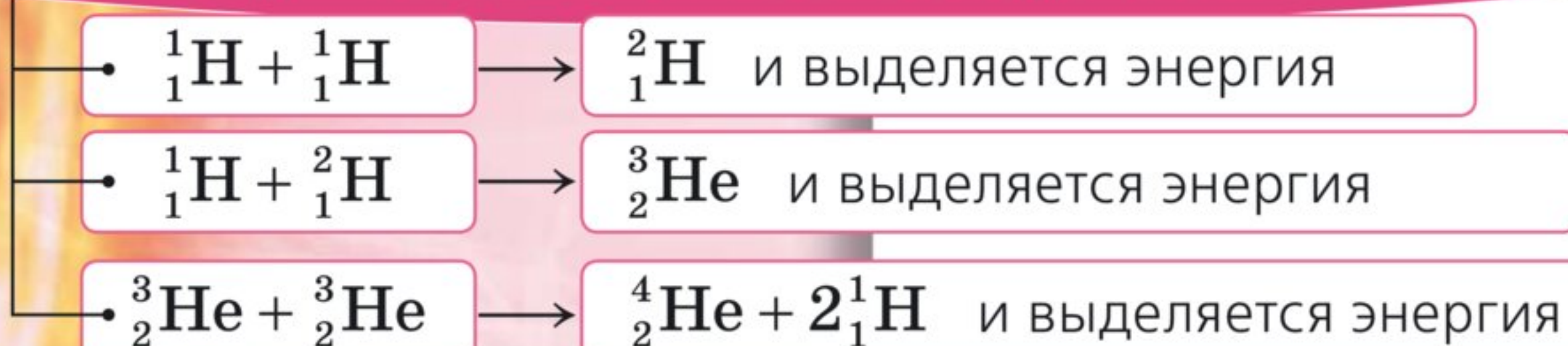
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое термоядерные реакции и при каких условиях они протекают.
- Какая энергия выделяется при термоядерных реакциях.
- Как можно применять термоядерные реакции.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ядерные силы?
- Что такое ядерные реакции?
- Как рассчитывают энергетический выход ядерных реакций?

Термоядерные реакции происходят в недрах Солнца и других звёзд, состоящих в основном из водорода. Например, четыре ядра водорода (протона) в результате ядерных реакций образуют ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА СОЛНЦЕ

Термоядерные реакции более эффективны с точки зрения выделения энергии, чем реакции деления ядер. Так, в реакции синтеза гелия на один нуклон выделяется энергия $17,8/5 = 3,5$ МэВ/нуклон. Для сравнения: в реакции деления урана выделяется энергия $\sim 0,8$ МэВ/нуклон, что примерно в 4 раза меньше.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Кроме реакции деления, огромная энергия выделяется и в реакциях синтеза (слияния) лёгких ядер.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И УСЛОВИЯ ИХ ПРОТЕКАНИЯ

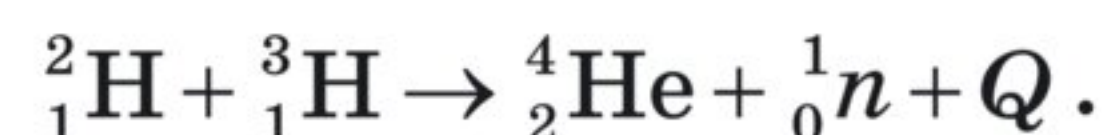
Для того чтобы произошло слияние ядер, необходимо приблизить их на расстояние, на котором начинают действовать ядерные силы, т. е. порядка 10^{-15} м. Однако, так как атомные ядра положительно заряжены, при их сближении возникают мощные силы кулоновского отталкивания. Чтобы преодолеть это отталкивание, атомные ядра должны обладать высокой энергией, т. е. двигаться навстречу друг другу с большими скоростями.

Ускоренные частицы можно получить на ускорителе либо в сильно нагретом состоянии. Температура вещества должна достигать 10^7 — 10^8 К. При такой высокой температуре вещество представляет собой полностью ионизированный газ, состоящий из ядер и электронов, т. е. плазму. Поэтому реакции синтеза, протекающие при высоких температурах, называют **термоядерными**.

ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЮЩАЯСЯ ПРИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Масса образовавшегося в результате термоядерной реакции ядра оказывается меньше суммарной массы исходных ядер. Это означает, что при слиянии лёгких ядер выделяется энергия. Действительно, для ядер с массовым числом $A < 60$ удельная энергия связи растёт с увеличением A , поэтому энергия связи образовавшегося более тяжёлого ядра больше

энергии связи исходных лёгких ядер. Рассмотрим реакцию синтеза ядер дейтерия и трития с образованием гелия:



Оценим, какая энергия Q выделяется в данной реакции. Удельная

энергия связи дейтерия равна 1,1 МэВ/нуклон, трития — 2,8 МэВ/нуклон, а гелия — 7,1 МэВ/нуклон. В ядре дейтерия 2 нуклона, в ядре трития 3 нуклона, поэтому для разделения ядер дейтерия и трития на составляющие их нуклоны необходимо потратить энергию:

$$1,1 \cdot 2 + 2,8 \cdot 3 = 10,6 \text{ МэВ.}$$

В ядре гелия 4 нуклона, поэтому при синтезе гелия выделяется энергия $7,1 \cdot 4 = 28,4$ МэВ. Следовательно, энергетический выход данной реакции $Q = 28,4 - 10,6 = 17,8$ МэВ. Это приблизительно соответствует экспериментальным данным.

УПРАВЛЯЕМЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Для использования энергии, освобождающейся при реакциях синтеза, нужно научиться осуществлять управляемые термоядер-

ные реакции. Тогда человечество получило бы практически неисчерпаемый источник энергии, по эффективности превосходящий все остальные источники. Однако реализовать данный процесс в земных условиях очень сложно: вещество нужно нагреть до температуры в несколько миллионов кельвинов, чтобы оно превратилось в плазму, а затем поддерживать это состояние. Удерживать высокотемпературную плазму в замкнутом объёме и изолировать её от стенок реактора можно либо с помощью сильных магнитных полей, либо используя лазерные лучи.

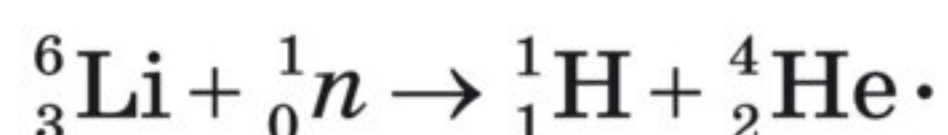


Первые исследования возможности создания термоядерного реактора появились в 1950-х гг., а первый реактор был построен в 1954 г. в СССР в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова. В настоящее время наиболее проработан реактор типа токамак (тороидальная камера с магнитными катушками). Токмак представляет собой камеру в виде тора (бублика), надетую

на сердечник трансформатора (это вторичная обмотка). По первичной обмотке трансформатора пускают импульс тока, в результате во вторичной обмотке (газе) происходит газовый разряд, и газ нагревается до высокой температуры, необходимой для начала термоядерной реакции. Вокруг протекающего в камере электрического тока возникает магнитное поле, удерживающее плазму в этой системе.



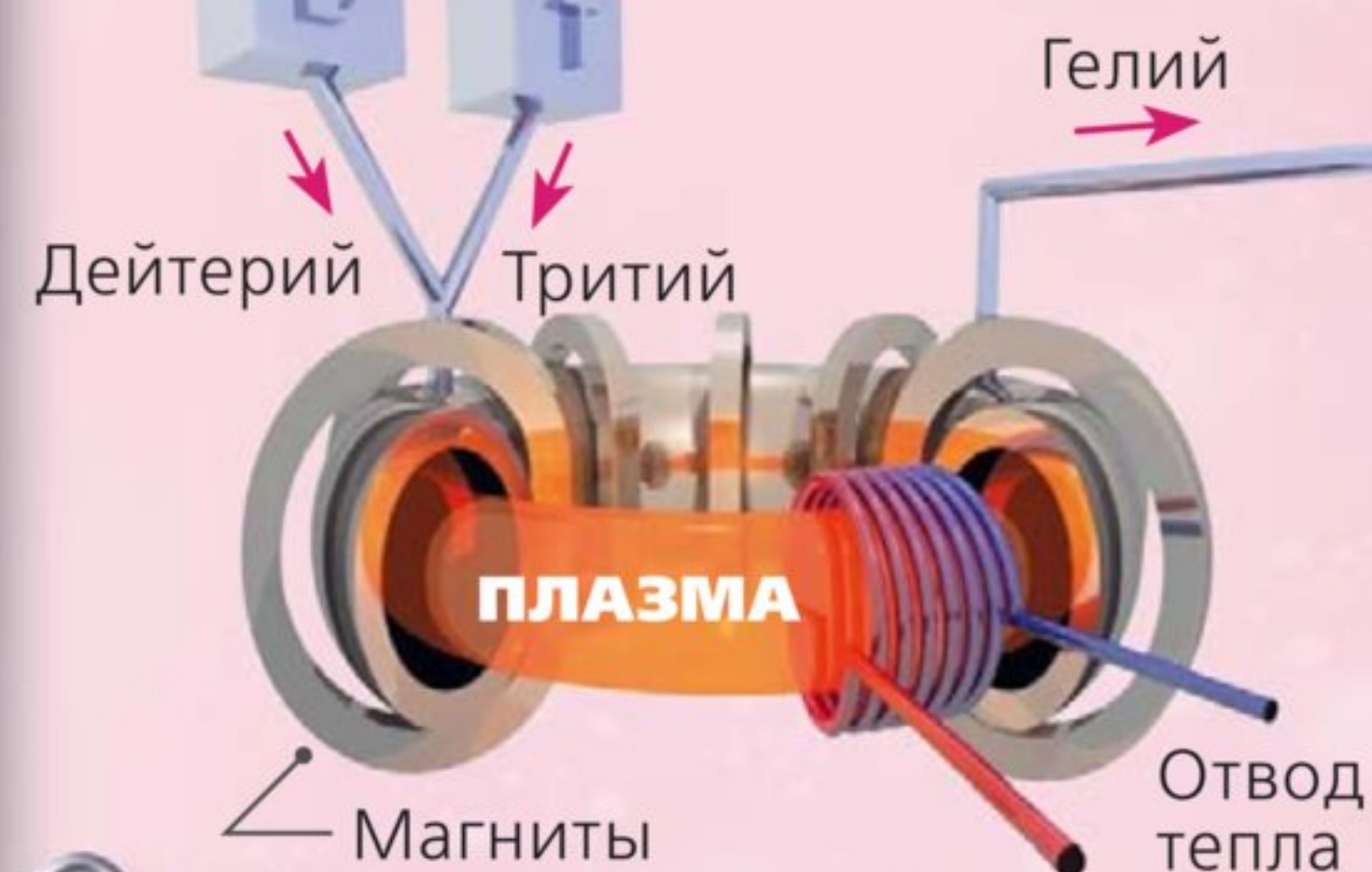
Реакция синтеза гелия из дейтерия и трития наиболее перспективна для использования в термоядерном реакторе и сравнительно легко осуществима с помощью современных технологий. Дейтерий можно получить из воды, а тритий производят на ядерном реакторе путём облучения лития нейтронами:



Существенным недостатком реакции синтеза гелия является значительное количество радиоактивных отходов в виде быстрых нейтронов. Учёные изучают возможность использования так называемых *безнейтронных* термоядерных реакций, т. е. реакций, в которых не образуются нейтроны, вызывающие радиоактивное загрязнение в конструкциях реактора. Термоядерным топливом для таких реакций может служить дейтерий и изотоп гелия-3:



Эту реакцию сложнее осуществить, так как для её протекания необходимо достичь температуру в 10^9 К . На Земле гелий-3 получают в ограниченных количествах.



Первая водородная бомба была создана в СССР под руководством А. Сахарова и В. Гинзбурга и взорвана в 1953 г. на полигоне в Семипалатинске. Мощность бомбы составляла 400 килотонн, что в 20 раз превосходило эффективность первых атомных бомб, созданных в США и СССР.

НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Неуправляемая термоядерная реакция протекает в водородной бомбе, которая действует следующим образом. Внутри оболочки взрывается небольшая атомная бомба, в результате чего образуются нейтроны и создаётся высокая температура, необходимая для начала термоядерной реакции. Нейтроны бомбардируют термоядерное топливо — соединение дейтерия с литием. Под действием нейтронов литий расщепляется на гелий и тритий. Затем начинается термоядерная реакция дейтерия и трития, в результате которой выделяется огромное количество энергии.

ВОПРОСЫ:

- Какие условия необходимы для начала термоядерной реакции?
- Какая реакция более эффективна с точки зрения выделения энергии: синтеза или деления?
- Какие элементы могут служить топливом для термоядерных реакций?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое поглощённая доза излучения.
- Что такое эквивалентная поглощённая доза излучения.
- Единицы в дозиметрии.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое альфа-частицы, бета-частицы и гамма-излучение?
- Что такое радиоактивность?

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Самой первой единицей дозы излучения был рентген (Р); он определялся по ионизации, производимой излучением. В настоящее время 1 Р определяют как дозу рентгеновского или γ -излучения, при которой 1 см³ воздуха при нормальном давлении образуется около $2 \cdot 10^9$ пар ионов.

ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ. ДОЗИМЕТРИЯ

Излучения, возникающие при радиоактивных превращениях и распадах, оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Рассмотрим, какое излучение наиболее опасно для человека и как от него можно защититься.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Когда в обыденной жизни употребляют слово «радиация», то имеют в виду ионизирующее излучение, которое представляет собой потоки альфа- и бета-частиц, гамма-квантов и нейтронов. Такое излучение, проходя через вещество, выбивает электроны из его атомов и молекул, т. е. происходит ионизация среды. Ионизация атомов и молекул живой клетки может вызвать её значительные поражения. С другой стороны, излучения применяются для лечения некоторых заболеваний, например рака. Поэтому важно уметь определять количество (дозу) излучения, проходящего через то или иное вещество. Этим и занимается *дозиметрия*.



Альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов. Энергия α -частиц 1—2 МэВ; длина их пробега в воздухе 2—10 см, а длина пробега α -частиц в биологических тканях 30—50 мкм. Бета-излучение — это поток электронов, испускаемых ядрами при бета-распаде. Длина пробега β -частиц в воздухе в зависимости от их энергии 1 см — 20 м. Гамма-излучение — это самое коротковолновое электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне примерно от 10^{-10} до 10^{-14} м. Нейтронное излучение — это поток частиц, не имеющих электрического заряда. Масса нейтрона приблизительно в четыре раза меньше, чем масса α -частиц.

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ Мощность (интенсивность) источника излучения в заданный момент времени характеризуют его активностью, или числом распадов в секунду. Используется специальная единица активности — *кюри* (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ расп./с.}$$

Воздействие излучений на живые организмы характеризуется физической величиной, называемой *дозой излучения*. Доза излучения — это количество переданной организму энергии. Чем больше энергия ионизирующего излучения, переданная организму, тем сильнее могут быть поражения тканей.

Для удобства измерения используется **поглощённая доза излучения** — энергия ионизирующего излучения, поглощённая облучаемым веществом и рассчитанная на единицу массы.

Поглощённая доза излучения равна отношению энергии, поглощённой телом, к его массе:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В системе СИ дозу излучения выражают в *греях* (Гр). Один грей равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия любого ионизирующего излучения, равная 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/1 кг}.$$

Поглощённая доза излучения зависит от вида и интенсивности излучения, а также от времени облучения. Чем больше поглощённая доза, тем больший вред она может принести живому организму. Но биологический эффект, который оказывает ионизирующее излучение на живой организм, зависит не только от поглощённой дозы излучения, но и от вида ионизирующего излучения. Поэтому говорят, что разные виды излучения обладают различной *относительной биологической эффективностью* (ОБЭ). Биологическое воздействие любого вида ионизирующего излучения принято сравнивать с аналогичными эффектами, возникающими вследствие рентгеновского излучения или γ -излучения, считающегося образцовым. На основе данных об ОБЭ разные виды ионизирующего излучения характеризуются своими коэффициентами качества. Значения коэффициента качества для рентгеновского и γ -излучения $K=1$. При этом α -излучение имеет коэффициент качества $K=20$, что означает, что при одинаковой поглощённой дозе биологический эффект от действия α -излучения в 20 раз больше, чем от γ -излучения.

Произведение коэффициента качества (K) и поглощённой дозы (D) называют **эквивалентной поглощённой дозой** (H): $H = KD$. Эквивалентная поглощённая доза является количественной мерой последствий облучения живого организма. Единица эквивалентной дозы в СИ — *зиверт* (Зв). Из формулы следует, что 1 Зв равен поглощённой дозе в 1 Гр для рентгеновского или γ -излучения, у которых $K=1$, или, по-другому, 1 Зв — это количество энергии, поглощённое килограммом биологической ткани, равное по воздействию поглощённой дозе 1 Гр.

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ Все существа на Земле подвергаются постоянному воздействию ионизирующей радиации путём внешнего и внутреннего облучения за счёт естественных и искусственных источников излучения. *Естественные источники* — это космическое излучение и природные радиоактивные вещества. *Искусственные источники* — это отходы атомной промышленности, радиоактивные отходы, используемые в биологии, медицине, сельском хозяйстве и др. Ионизирующие излучения могут проникать сквозь вещество, причём различные вещества по-разному их поглощают. В качестве материалов для защиты используют свинец, свинцовое стекло, железо (сталь), кирпич, бетон, а иногда и воду.

Приборы для измерения эквивалентной поглощённой дозы ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени называют *дозиметрами*. Дозиметры бывают профессиональные, бытовые, индивидуальные, промышленные и военные.



Равенство зиверта и грея показывает, что эквивалентная поглощённая доза и поглощённая доза имеют одинаковую размерность. Но это не означает, что эффективная доза численно равна поглощённой дозе. При определении эквивалентной поглощённой дозы учитывается биологическое воздействие радиации. Она равна поглощённой дозе, умноженной на коэффициент качества, зависящий от вида излучения, и характеризует биологическую активность того или иного вида излучения.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Чем отличается поглощённая доза излучения от эквивалентной поглощённой дозы излучения?
- Объясните физический смысл единицы дозы излучения.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое элементарные частицы.
- Что такое античастицы.
- Что такое кварки.

ВСПОМНИТЕ:

- Каково строение атомного ядра?
- Как связаны между собой масса и энергия?
- Что такое ядерные силы?

При столкновении частиц, обладающих очень высокими кинетическими энергиями, масса образовавшихся частиц может даже превзойти массу сталкивающихся частиц. При этом все возможные реакции превращения и рождения элементарных частиц, происходящие в результате их синтеза, распада или столкновения, подчиняются законам сохранения.

Частицы и античастицы равноправны, а их обозначения весьма условны. Можно было бы считать позитрон частицей, а электрон античастицей. Все процессы, протекающие с частицами, происходят и с античастицами. Подобно протонам и нейтронам, из антипротона и антинейтрона могут образоваться антиядра, а из антиядер можно построить антиатомы и антивещество. Антивещество может существовать сколь угодно долго, пока не вступит во взаимодействие с веществом. В нашей наблюдаемой части Вселенной присутствует только вещество. Антивещество учёные научились получать только в лабораториях.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Элементарными частицами называют частицы, которые нельзя разделить на составные части. По мере развития представлений о строении вещества это понятие менялось.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ

До конца XIX в. элементарными, т. е. неделимыми, частицами считались атомы, из которых состоят все вещества. В 1911 г. опыты Э. Резерфорда показали, что атом имеет сложную структуру и состоит из ядра и электронов. Дальнейшие эксперименты показали, что ядро, так же как и атом, имеет сложное строение и состоит из протонов и нейтронов. С появлением квантовой теории возникло представление о квантах электромагнитного излучения — фотонах.

Таким образом, к 1932 г. были известны четыре элементарные частицы: протон, нейтрон, электрон и фотон. С тех пор был открыто более 350 элементарных частиц.

ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Основным методом изучения элементарных частиц является наблюдение за результатом столкновения частиц очень высоких энергий. В 1950-х гг. были построены первые *ускорители элементарных частиц* — установки, в которых получают заряженные частицы высоких энергий, т. е. со скоростями, близкими к скорости света. Позднее появились *коллайдеры* — ускорители, в которых разгоняются два пучка заряженных частиц в противоположных направлениях и сталкиваются друг с другом.

Оказалось, что при столкновении частиц высоких энергий элементарные частицы не распадаются на более мелкие фрагменты, а образуются новые элементарные частицы. Такое превращение возможно благодаря теории относительности, согласно которой энергия эквивалентна массе ($E = mc^2$), т. е. высокая кинетическая энергия частиц может быть преобразована в массу новой элементарной частицы.

Большинство открытых элементарных частиц являются нестабильными. Они существуют 10^{-6} — 10^{-23} с, а затем превращаются в другие элементарные частицы. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон, время его жизни порядка 15 мин.

АНТИЧАСТИЦЫ У каждой элементарной частицы есть свой двойник, называемый *античастицей*. У частицы и античастицы совпадают массы, время жизни и некоторые другие характеристики, они различаются лишь знаком электрического заряда.

Впервые существование антиэлектрона — частицы с массой, равной массе электрона, но с положительным элементарным зарядом, — было предсказано английским

физиком П. Дираком в 1928 г. Эта частица была обнаружена в 1932 г. американским физиком К. Андерсоном и названа *позитроном* (${}^0_{+1}e$).

При столкновении частицы и её античастицы происходит *аннигиляция*, т.е. их превращение в фотоны и другие элементарные частицы. Например, при столкновении электрона и позитрона они исчезают, превращаясь в фотоны высокой энергии. Возможен и обратный процесс: при столкновении фотона с достаточно большой энергией с ядром происходит рождение *электронно-позитронной пары*.

КВАРКИ Изучая элементарные частицы, рождающиеся при столкновениях частиц, обладающих высокими энергиями, учёные обнаружили, что некоторые из них обладают сходными свойствами. Эти элементарные частицы взаимодействовали посредством ядерных сил так же, как протоны и нейтроны в ядре. Такой класс частиц назвали *адронами*. Для систематизации адронов в 1964 г. американскими физиками М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом независимо друг от друга была выдвинута гипотеза, что протоны, нейтроны и другие адроны состоят из ещё более мелких частиц, названных *кварками*.

Кварки в свободном состоянии обнаружить пока не удаётся, однако их существование доказано экспериментом, проведённым в 1990 г. Дж. Фридманом, Г. Кендаллом и Р. Тейлором (США). Этот эксперимент был внешне похож на опыты Э. Резерфорда по рассеянию α -частиц на золотой фольге, но вместо α -частиц использовались релятивистские электроны, которые сталкивались с протонами. Изучая углы рассеяния частиц, учёные пришли к выводу о сложной структуре протона.

В настоящее время известны шесть разновидностей кварков: верхний — обозначается *u*-кварк (от англ. *up*), нижний — *d*-кварк (*down*), странный — *s*-кварк (*strange*), очарованный — *c*-кварк (*charmed*), красивый — *b*-кварк (*beauty*) и истинный — *t*-кварк (*truth*).

Особенностью кварков является то, что они имеют дробный электрический заряд $+\frac{2}{3}e$ или $-\frac{1}{3}e$, где e — элементарный электрический заряд.

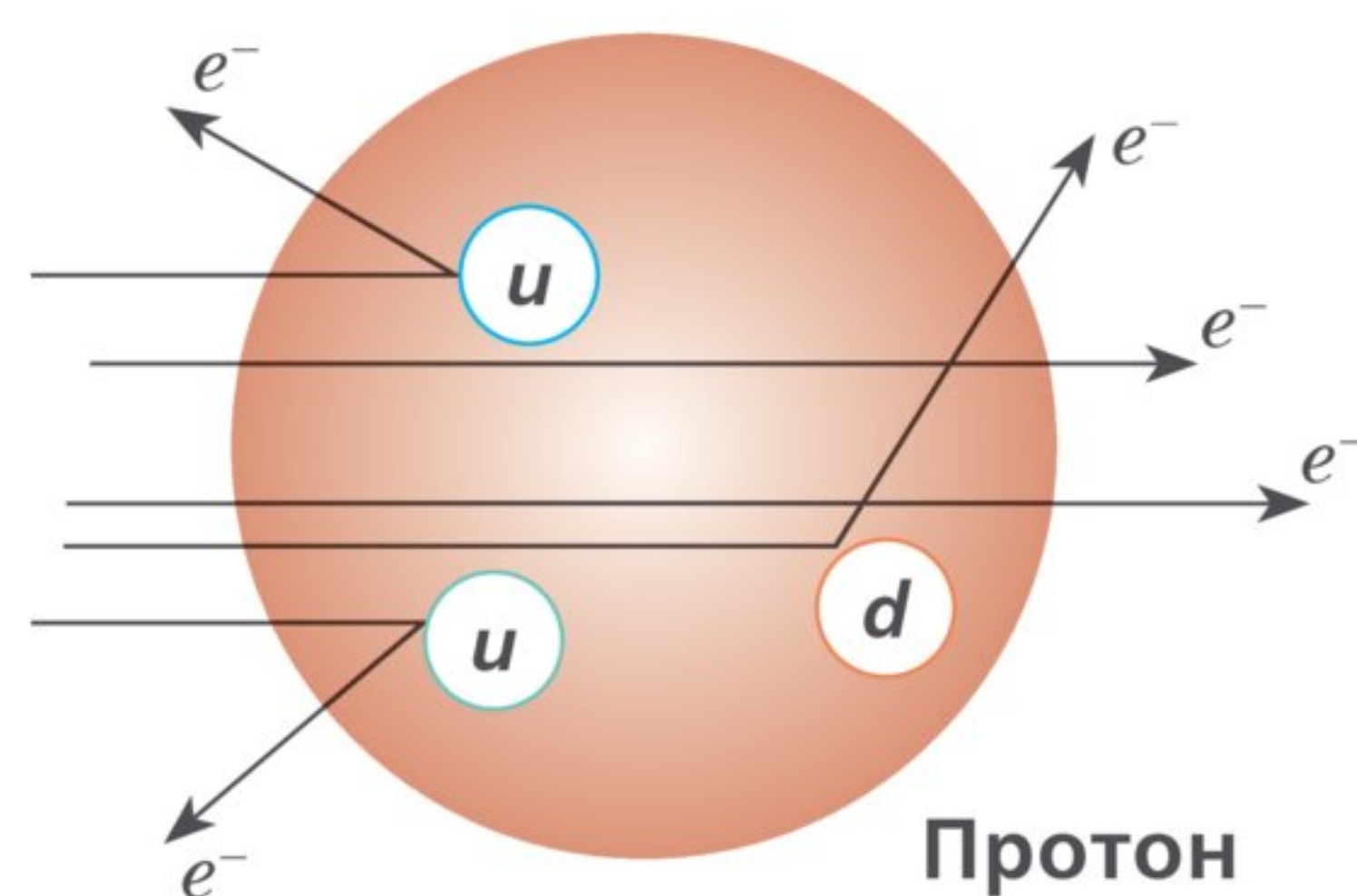
Протон состоит из трёх кварков (*uud*), имеющих заряды $+\frac{2}{3}e$, $+\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$, поэтому общий заряд протона равен e .

Нейтрон также состоит из трёх кварков (*udd*), имеющих заряды $+\frac{2}{3}e$, $-\frac{1}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$, поэтому общий заряд нейтрона равен нулю.

Учитывая, что, по современным представлениям, нуклоны и другие адроны имеют сложную внутреннюю структуру, понятие «элементарная частица» употребляется не в своём точном значении, а менее строго — для обозначения мельчайших частиц вещества, которые не являются атомами или атомными ядрами.

Для некоторых нейтральных частиц частица и античастица могут совпадать. Например, антифотон тождественен фотону.

Даже если во Вселенной и существуют миры из антивещества, то обнаружить их методами спектроскопии не представляется возможным, поскольку изменение знака зарядов не изменяет частоту излучения, а значит, и положение соответствующих спектральных линий.



Кроме зарядов, кварки различаются ещё по массе и ряду других характеристик. Учёные установили, что массы *u*- и *d*-кварков примерно в 150 раз меньше массы протона, а масса самого тяжёлого *t*-кварка сопоставима с массой ядра золота. В современной физике всё ещё остаётся открытым вопрос: как относительно лёгкие *u*- и *d*-кварки образуют относительно тяжёлые протоны и нейтроны?

ВОПРОСЫ:

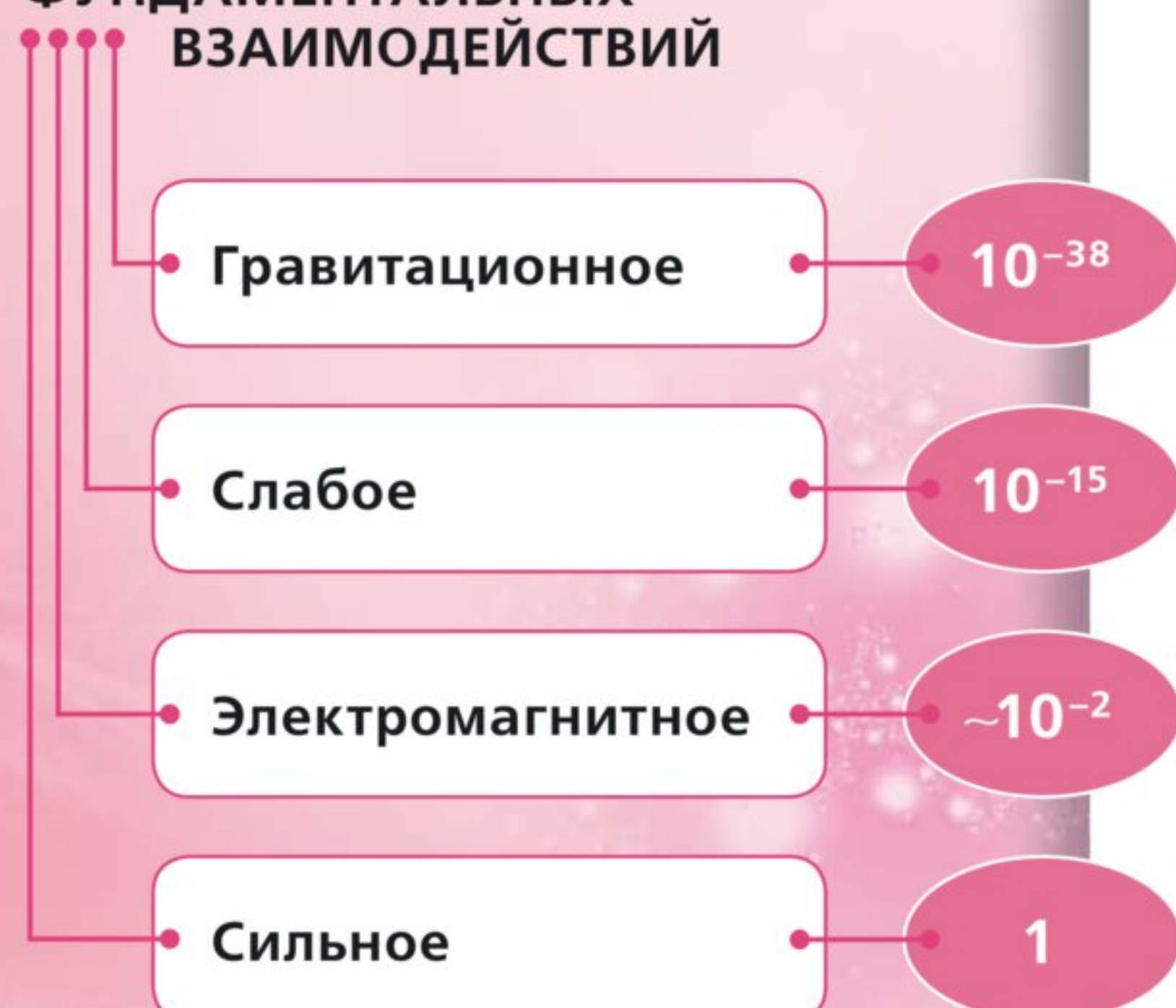
- Какие частицы называют элементарными?
- Чем различаются частицы и античастицы и что в них общего?
- Каково особое свойство кварков?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как классифицируют элементарные частицы.
- Что такое фундаментальные взаимодействия.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое элементарные частицы?
- Что такое кварки?
- Что такое ядерные силы?

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В ПРИРОДЕ****СРАВНИТЕЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В настоящее время открыто более 350 элементарных частиц и античастиц. При таком количестве возникает необходимость их классификации.

ТИПЫ КЛАССИФИКАЦИЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Все элементарные частицы можно классифицировать по нескольким сходным признакам. *По времени жизни* различают стабильные и нестабильные элементарные частицы. Стабильные частицы могут существовать длительное время, не превращаясь в другие частицы. К ним относятся протон, нейтрон, фотон, нейтрино и др. Нестабильные частицы через короткое время (10^{-6} — 10^{-23} с) превращаются в другие частицы. *В зависимости от массы* различают безмассовые частицы, масса которых равна нулю (например, фотон), и все остальные частицы с ненулевой массой. Также элементарные частицы классифицируют *по видам взаимодействий*, в которых они участвуют.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В природе существует четыре типа взаимодействий, которые называют *фундаментальными*. Все процессы, происходящие с элементарными частицами, связаны с фундаментальными взаимодействиями. К фундаментальным взаимодействиям относят гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое.

В *гравитационном взаимодействии* участвуют все тела, имеющие массы. Однако в микромире массы элементарных частиц очень малы, поэтому влияние гравитационных сил пренебрежимо мало по сравнению с другими типами взаимодействий.

Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством электромагнитного поля. В нём участвуют все заряженные тела и частицы, обладающие электрическим зарядом. Именно электромагнитное взаимодействие отвечает за существование атомов и молекул. Взаимодействие между электронами и ядром атома и между атомами в молекуле имеет электромагнитную природу.

Сильные и слабые взаимодействия проявляются только внутри атомного ядра. *Сильное взаимодействие* выражается в виде действия ядерных сил. Ядерные силы не только действуют между протонами и нейтронами, удерживая их в ядре, но и связывают кварки внутри протонов и нейтронов. В *слабом взаимодействии* участвуют все элементарные частицы, кроме фотона. Оно действует на расстояниях, примерно в 1000 раз меньших, чем при сильных взаимодействиях, порядка 10^{-18} м (т. е. около

0,1% диаметра протона). Слабое взаимодействие отвечает за большинство распадов элементарных частиц.

АДРОНЫ, ЛЕПТОНЫ И ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В зависимости от участия в том или ином типе взаимодействия элементарные частицы разделяют на два класса: адроны и лептоны. *Адроны* участвуют во всех видах фундаментальных взаимодействий. Все адроны состоят из кварков. По составу адроны, в свою очередь, делятся на две группы: барионы, состоящие из трёх кварков, и мезоны, состоящие из кварка и антикварка. Именно к барионам относятся протоны и нейтроны, входящие в состав атомного ядра. *Лептоны* — это элементарные частицы, которые не участвуют в сильных взаимодействиях. В настоящее время известны шесть типов лептонов. Среди них электрон и нейтрино.

Существует ещё один класс элементарных частиц, посредством которых осуществляются фундаментальные взаимодействия. Это так называемые *переносчики взаимодействия*. Согласно современным представлениям фундаментальные взаимодействия в мире элементарных частиц осуществляются в результате обмена частицами-квантами того или иного поля. Электромагнитное взаимодействие происходит вследствие обмена *фотонами* — квантами электромагнитного поля. Сильное взаимодействие осуществляется посредством обмена частицами — *глюонами*. Так же как и фотон, глюон — безмассовая частица. Переносчиками слабого взаимодействия являются три частицы: W^+ , W^- и Z^0 бозоны. Учёные предполагают, что переносчиком гравитационного взаимодействия является частица гравитон, однако экспериментально обнаружить её пока не удалось.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ После того как было обнаружено, что адроны состоят из кварков, адроны целесообразно называть не элементарными частицами, а просто частицами. А частицы, у которых отсутствует внутренняя структура, т.е. которые уже нельзя поделить на составные части, принято называть *фундаментальными частицами* или *истинно элементарными частицами*. В настоящее время к фундаментальным частицам относятся лептоны, кварки и переносчики взаимодействий.

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И ТЕОРИЯ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Стандартной моделью принято называть современную теорию строения и взаимодействия элементарных частиц. Основные положения Стандартной модели согласуются с большинством экспериментов. Она описывает три из четырёх фундаментальных взаимодействий: электромагнитное, сильное и слабое, но не включает в себя гравитацию и не согласуется с теорией относительности. Учёные пытаются создать новую теорию Великого объединения, объединяющую все известные типы взаимодействий.

Названия частиц *адроны* (в пер. с греч. — крупный, массивный) и *лептоны* (в пер. с греч. — лёгкий) были предложены в то время, когда среди лептонов были известны только электрон и нейтрино — самые лёгкие из элементарных частиц. Позднее открыли частицу *тау-лептон*, масса которой оказалась в два раза больше массы самого лёгкого адрона.



Стандартная модель предполагает наличие ещё одного поля — *поля Хиггса* (названо по имени английского физика П. Хиггса). Считается, что поле Хиггса отвечает за массу частиц. Частицы, сильно взаимодействующие с полем Хиггса, тяжелее частиц, слабо взаимодействующих с этим полем. Фотон не взаимодействует с полем Хиггса, поэтому его масса равна нулю. Квантом поля Хиггса является бозон Хиггса, обнаруженный в 2012 г. на Большом адронном коллайдере.

ВОПРОСЫ:

- Какие существуют типы фундаментальных взаимодействий?
- На основе каких критериев осуществляют классификацию элементарных частиц?

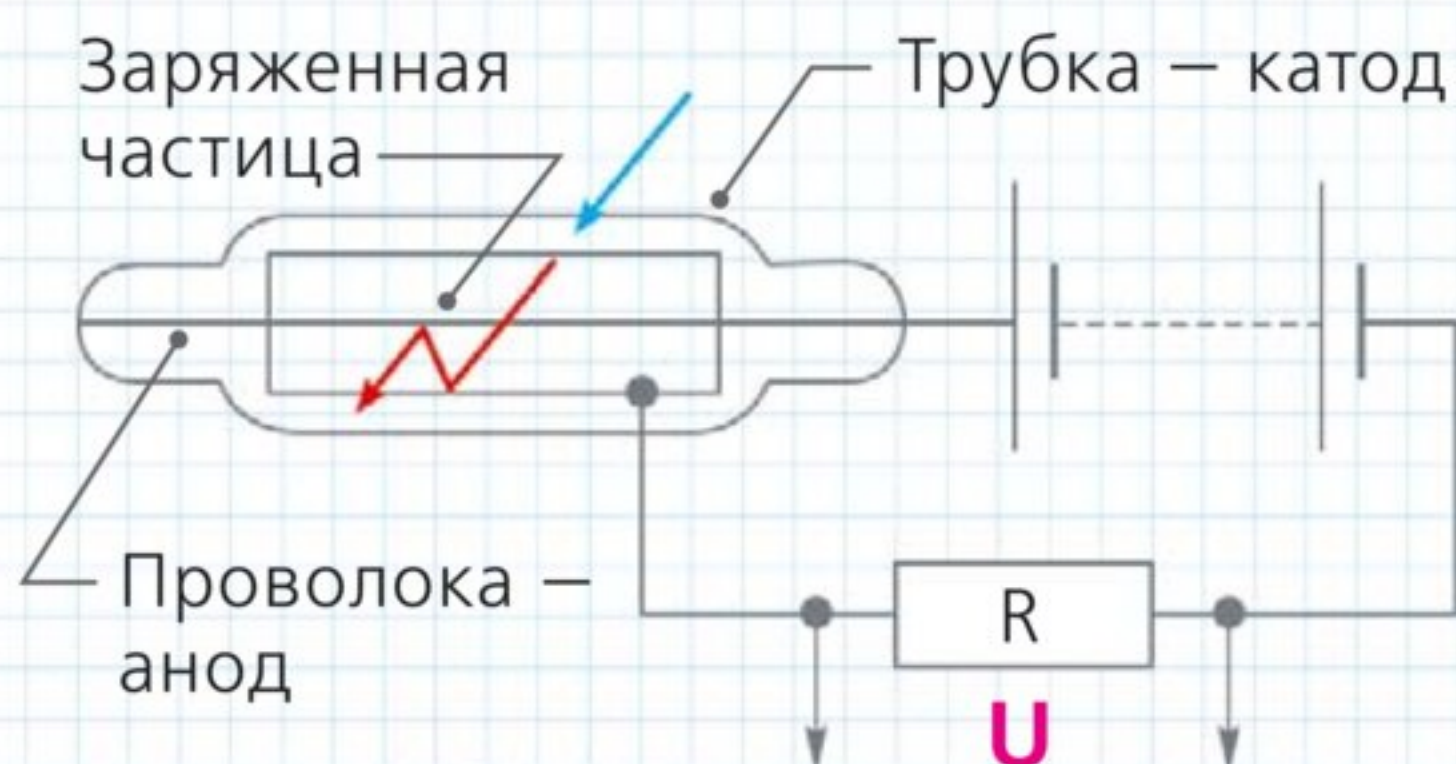
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Устройство и принцип действия счётчика Гейгера.
- Устройство и принцип действия пузырьковой камеры.
- Устройство и принцип действия камеры Вильсона.
- Что такое ядерные фотоэмульсии.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ионизация атомов?
- Что собой представляет электрический ток в газе?
- Что такое сила Лоренца?

Нейтральные частицы обнаружить сложнее, чем заряженные. В результате прохождения нейтральных частиц через вещество не происходит ионизации среды. Нейтральные частицы обнаруживают только после их взаимодействия с другими частицами, в результате которого образуются заряженные частицы, которые уже легко регистрируются приборами.



ПРИБОРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Частицы, образующиеся в результате ядерных реакций, нельзя увидеть невооружённым глазом. Но тогда как учёные узнают о результатах экспериментов в атомной и ядерной физике? Оказывается, с помощью специальных устройств можно не только обнаружить частицы, но и определить траекторию их движения и основные характеристики, такие, как масса, заряд, энергия, импульс и др.

ТИПЫ РЕГИСТРИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ

Проще всего обнаруживать и регистрировать заряженные частицы, так как они, проходя через вещество, вызывают ионизацию атомов среды. Приборы для регистрации заряженных частиц называют *детекторами*. Детекторы делятся на две группы: счётчики и камеры. *Счётчики* позволяют регистрировать прохождение частицы через прибор. Некоторые из них могут определять энергию и направление движения частицы. Примерами счётчиков являются газоразрядный счётчик Гейгера, ионизационная камера, сцинтилляционный счётчик и др. *Камеры* или *трековые детекторы* позволяют наблюдать и даже фотографировать треки (так называют траектории движения) частиц в приборе. К трековым детекторам относятся камера Вильсона, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии и др.

СЧЁТЧИК ГЕЙГЕРА представляет собой стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой покрыта металлическим проводящим слоем, и тонкую нить, натянутую вдоль оси трубки. Трубку заполняют разреженным инертным газом (обычно аргоном или неоном) и соединяют с источником тока высокого напряжения. Нить в трубке является анодом, а ее металлизированная поверхность — катодом. Последовательно счётчику включается резистор, сигнал с которого передаётся к регистрирующему устройству. Пока газ в трубке не ионизирован, ток в нём отсутствует. Если в трубку влетает заряженная частица, то она сталкивается с атомами газа и выбивает из них электроны. Электроны начинают ускоренно двигаться к аноду, выбивая на своём пути из атомов новые электроны, — возникает *ударная ионизация*. В трубке возникает кратковременный электрический ток, а на резисторе образуется импульс напряжения, который поступает в регистрирующее устройство. Перед тем как зарегистрировать следующую частицу, разряд автоматически гасится.

Счётчик Гейгера позволяет регистрировать до 10^4 частиц в секунду. Он применяется в основном для регистрации электронов и γ -квантов. Недостатком счётчика Гейгера является то, что прибор регистрирует частицы, но не распознаёт их, а также не измеряет их энергию.

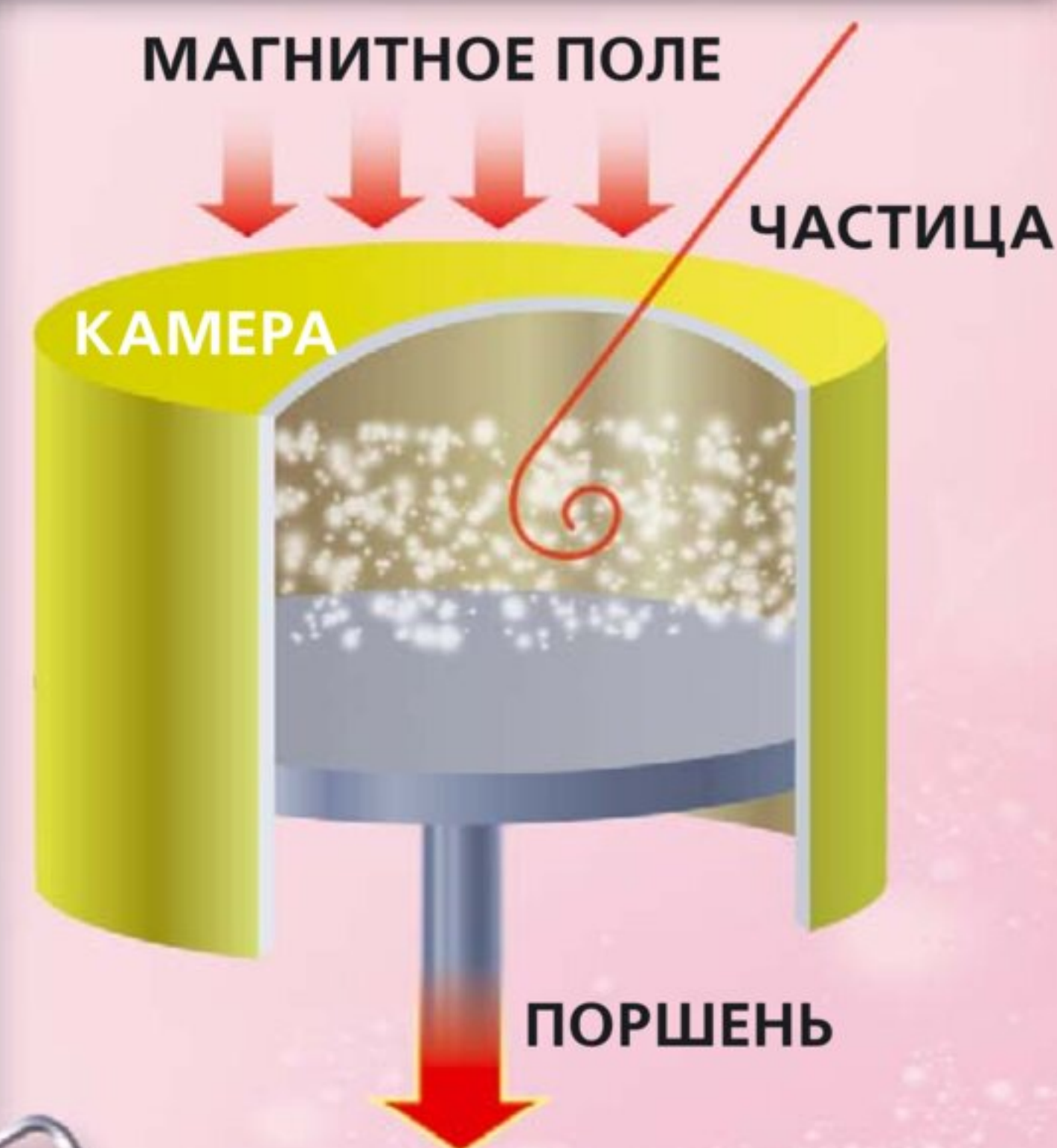
КАМЕРА ВИЛЬСОНА Одним из первых трековых детекторов является созданная в 1912 г. камера Вильсона. Она представляет собой стеклянный цилиндр, внутри которого может двигаться поршень. На дне камеры находится чёрная ткань, увлажнённая смесью воды со спиртом. Камера заполнена насыщенными парами этих жидкостей. Принцип действия камеры Вильсона основан на явлении конденсации. Известно, что конденсация происходит лучше, если в воздухе есть так называемые центры конденсации (например, мельчайшие пылинки). При быстром опускании поршня пары в камере адиабатно расширяются, их температура понижается, и пар становится перенасыщенным. Когда в камеру попадает заряженная частица, она образует на своём пути множество ионов. Эти ионы и являются центрами конденсации для перенасыщенного пара. Вокруг них начинают образовываться мельчайшие капельки жидкости. Таким образом, вдоль всего пути частицы остаётся видимый след из конденсированных капелек, который можно сфотографировать.

ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА На смену камере Вильсона пришли более усовершенствованные *пузырьковые* камеры, в которых вместо перенасыщенного пара используют перегретую жидкость (например, жидкий водород). Заряженная частица, пролетающая через камеру, вызывает резкое вскипание жидкости, и траектория частицы отмечается цепочкой пузырьков пара, образуя трек, который может быть сфотографирован. Пузырьковые камеры применяют для регистрации реакций взаимодействия и распада частиц с высокими энергиями. Недостатками пузырьковой камеры являются малое быстродействие и невозможность автоматического управления.

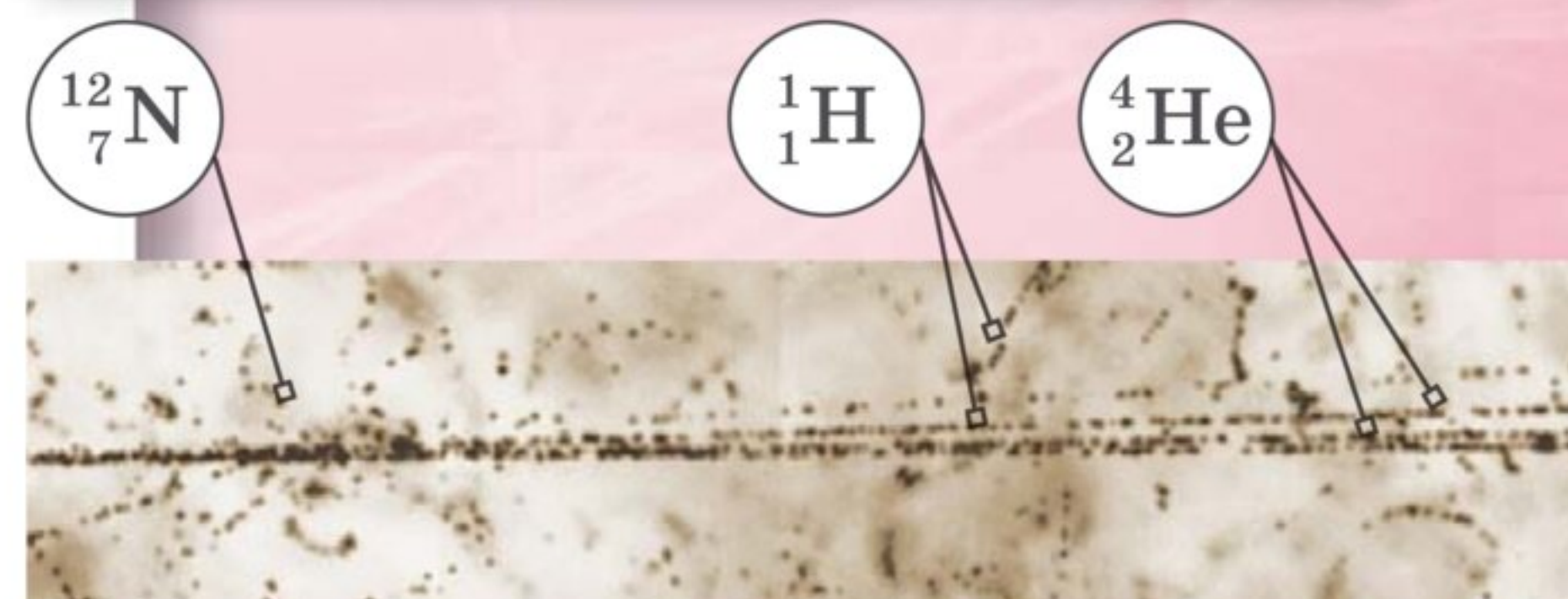
ЯДЕРНЫЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ — один из первых экспериментальных методов регистрации треков заряженных частиц (А. Беккерель применял этот метод ещё в 1896 г.), применяющийся и в настоящее время. В этом методе используют специальные фотопластинки, покрытые эмульсионным слоем, состоящим из солей серебра. Заряженные частицы, проходя через фотопластинку, ионизируют атомы, встречающиеся на их пути. В результате после специальной химической обработки (проявки) эмульсионных слоёв в них появляются следы частиц в виде цепочки проявленных точек — треков, хорошо различаемых под микроскопом. Ядерные фотоэмульсии используют для регистрации и анализа следов заряженных частиц в широком диапазоне энергий. По измерениям характеристик этих следов можно идентифицировать частицу, определить её зарядовое и массовое числа, энергию, импульс.

Существенным преимуществом ядерных фотоэмульсий является то, что они дают неисчезающий трек частицы, а время экспозиции может быть достаточно большим, что позволяет регистрировать редкие ядерные превращения.

Советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру Вильсона в однородное магнитное поле. В магнитном поле на заряженную частицу действует сила Лоренца, которая искривляет траекторию движения частицы. По кривизне траектории можно судить об отношении заряда частицы к её массе.



Из-за теплового движения молекул трек частицы быстро размывается. Он может быть отчётливо виден лишь около 0,1 с. По виду трека можно оценивать энергию, скорость и массу частиц.



ВОПРОСЫ:

- Каков принцип работы счётчика Гейгера?
- Чем отличается камера Вильсона от пузырьковой камеры?
- Можно ли с помощью ядерных фотоэмульсий регистрировать незаряженные частицы?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на закон радиоактивного распада.
- Как решать задачи на вычисление энергии связи.
- Как решать задачи на вычисление энергетического выхода реакций.

ЗАДАЧА 1 Какие заряд Z и массовое число A будет иметь ядро элемента, полученного из ядра изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ после одного α -распада и двух β -распадов?

Решение:

При α -распаде массовое число уменьшается на четыре единицы, а зарядовое число уменьшается на две единицы.

При β -распаде массовое число не изменяется, так как электрон является очень лёгкой частицей, а зарядовое число при этом увеличивается на единицу.

Следовательно, в результате трёх последовательных распадов вновь образуется изотоп урана с зарядом $Z = 92$ и массовым числом $A = 234$.

Ответ: $Z = 92$; $A = 234$.

ЗАДАЧА 2 Период полураспада изотопа полония-210 — 138 суток. Сколько ядер полония распадается за 30 суток в образце полония массой 1 г?

Дано:
 $T_{1/2} = 138$ сут.
 $m = 1$ г
 $t = 30$ сут.

СИ
 0,001 кг

Решение:
 Согласно закону радиоактивного распада число радиоактивных атомов спустя время t :

ΔN — ?

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}.$$

Начальное число атомов можно найти по формуле

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A,$$

где $M = 0,210$ кг/моль — молярная масса полония; $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль — число Авогадро.

Тогда число распавшихся атомов:

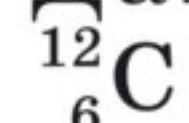
$$\begin{aligned} \Delta N &= N_0 - N = N_0 - N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} = N_0 (1 - 2^{-t/T_{1/2}}) = \\ &= \frac{m}{M} N_A (1 - 2^{-t/T_{1/2}}); \end{aligned}$$

$$\Delta N = \frac{0,001 \text{ кг}}{0,210 \text{ кг/моль}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot (1 - 2^{-30/138}) \approx 4 \cdot 10^{20}.$$

Ответ: $\Delta N \approx 4 \cdot 10^{20}$.

ЗАДАЧА 3 Вычислите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра атома углерода ${}_{6}^{12}\text{C}$.

Дано:



$Z = 6$

$N = 6$

$M_{\text{C}} = 12 \text{ а.е.м.}$

$m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$

$m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.}$

$m_e = 0,00055 \text{ а.е.м.}$

$\Delta m \text{ — ?}$

$E_{\text{св}} \text{ — ?}$

$E_{\text{уд}} \text{ — ?}$

Решение:

Дефект массы можно вычислить по формуле

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

Массу ядра атома углерода получим, вычитая из массы атома углерода массу шести его электронов: $M_{\text{я}} = M_{\text{C}} - 6m_e$.

$$\Delta m = 6 \cdot 1,00728 + 6 \cdot 1,00867 - (12 - 6 \cdot 0,00055) = 0,099 \text{ а.е.м.}$$

Энергия связи ядра:

$$E_{\text{св}} = 0,099 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \text{ МэВ/а.е.м.} = 92,17 \text{ МэВ.}$$

$$\text{Удельная энергия связи } E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

$$E_{\text{уд}} = \frac{92,17 \text{ МэВ}}{12} = 7,68 \text{ МэВ/нуклон.}$$

$$\text{Ответ: } \Delta m = 0,099 \text{ а.е.м.; } E_{\text{св}} = 92,17 \text{ МэВ;}$$

$$E_{\text{уд}} = 7,68 \text{ МэВ/нуклон.}$$

ЗАДАЧА 4Рассчитайте энергетический выход ядерных реакций при бомбардировке ядер лития ${}^7_3\text{Li}$: а) протонами (в результате образуются две α -частицы);б) α -частицами (в результате образуется ядро атома бора и выбивается нейтрон).

Дано:

$M_{\text{Li}} = 7,01600 \text{ а.е.м.}$

$M_{\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$

$M_{\text{B}} = 10,01294 \text{ а.е.м.}$

$m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$

$m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.}$

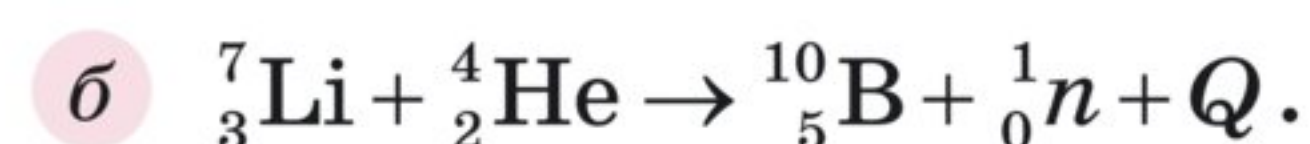
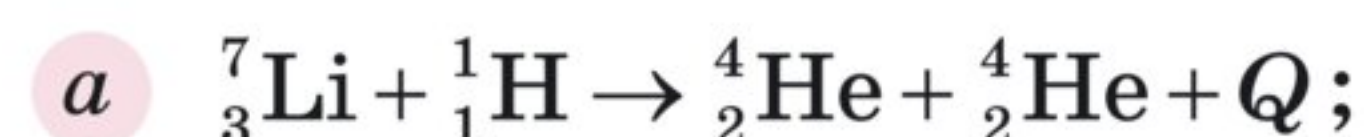
$m_e = 0,00055 \text{ а.е.м.}$

$Q_1 \text{ — ?}$

$Q_2 \text{ — ?}$

Решение:

Запишем ядерные реакции:

Энергетический выход ядерной реакции $Q = \Delta mc^2$, где Δm — разность масс исходных частиц и продуктов реакции.

Для ядерной реакции а):

$$\Delta m_1 = (M_{\text{Li}} - 3m_e) + m_p - 2(M_{\text{He}} - 2m_e);$$

$$\Delta m_1 = (7,016 - 3 \cdot 0,00055) + 1,00728 - 2(4,0026 - 2 \cdot 0,00055) = 0,01863 \text{ а.е.м.}$$

$$Q_1 = 0,01863 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \text{ МэВ/а.е.м.} = 17,34 \text{ МэВ.}$$

Для ядерной реакции б):

$$\Delta m_2 = (M_{\text{Li}} - 3m_e) + (M_{\text{He}} - 2m_e) - (M_{\text{B}} - 5m_e + m_n);$$

$$\Delta m_2 = (7,016 - 3 \cdot 0,00055) + (4,0026 - 2 \cdot 0,00055) - (10,01294 - 5 \cdot 0,00055 + 1,00867) = -0,003 \text{ а.е.м.}$$

$$Q_2 = -0,003 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \text{ МэВ/а.е.м.} = -2,8 \text{ МэВ.}$$

$$\text{Ответ: } Q_1 = 17,34 \text{ МэВ; } Q_2 = -2,8 \text{ МэВ.}$$



Энергию связи принято выражать в электрон-вольтах или мегаэлектрон-вольтах (МэВ). Найдём коэффициент для перевода энергии, выраженной в джоулях, в электрон-вольты, если дефект массы выражен в атомных единицах массы ($1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$).

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \rightarrow$$

$$1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 931 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 931 \text{ МэВ.}$$

Таким образом,

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot 931 \text{ МэВ/а.е.м.}$$



Энергетический выход реакции а) $Q_1 > 0$. Это означает, что реакция идёт с выделением энергии. $Q_2 < 0$, т.е. реакция б) идёт с поглощением энергии. Суммарная кинетическая энергия продуктов реакции (ядра бора и нейтрона) меньше, чем суммарная кинетическая энергия исходных частиц (ядра лития и гелия). В этом случае реакция б) начнётся, если кинетическая энергия исходных частиц превышает 2,8 МэВ.

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

РАДИОАКТИВНОСТЬ



деление

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

синтез



$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2$$

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$$

АТОМНОЕ ЯДРО



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Радиоактивность — способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению. Радиоактивное излучение имеет сложный состав: α-частицы (лишённые обоих электронов атомы гелия), β-частицы (электроны) и γ-излучение.
- Основной закон радиоактивного распада: для каждого вида радиоактивного вещества существует определённый интервал времени, по истечении которого его активность уменьшается в два раза. Этот временной интервал называется периодом полураспада.
- Протонно-нейтронная модель ядра: ядра всех атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов.
- Между ядерными частицами действуют короткодействующие ядерные силы.
- Энергией связи ядра называют ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны.
- Процесс превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов называют ядерной реакцией. Существует два типа ядерных реакций: реакции деления и реакции синтеза.
- Мельчайшие частицы вещества, не являющиеся атомами или атомными ядрами, называют элементарными частицами.
- В природе существует четыре типа фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое.

ПОДРОБНЕЕ...

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира. — М.: Аванта+, 2000.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Некоторые химические элементы, например радий, имеют весьма малый период полураспада по сравнению с возрастом Земли. Почему же их до сих пор обнаруживают в радиоактивных превращениях?
- Почему α-частицы, испускаемые радиоактивными препаратами, не могут вызвать ядерных реакций в тяжёлых элементах?
- Могут ли существовать объекты, состоящие только из одних нейтронов?

Элементы: Популярный сайт о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Ядерная физика в Интернете
<http://gotourl.ru/13740>



ФИЗИКА МАКРОКОСМОСА



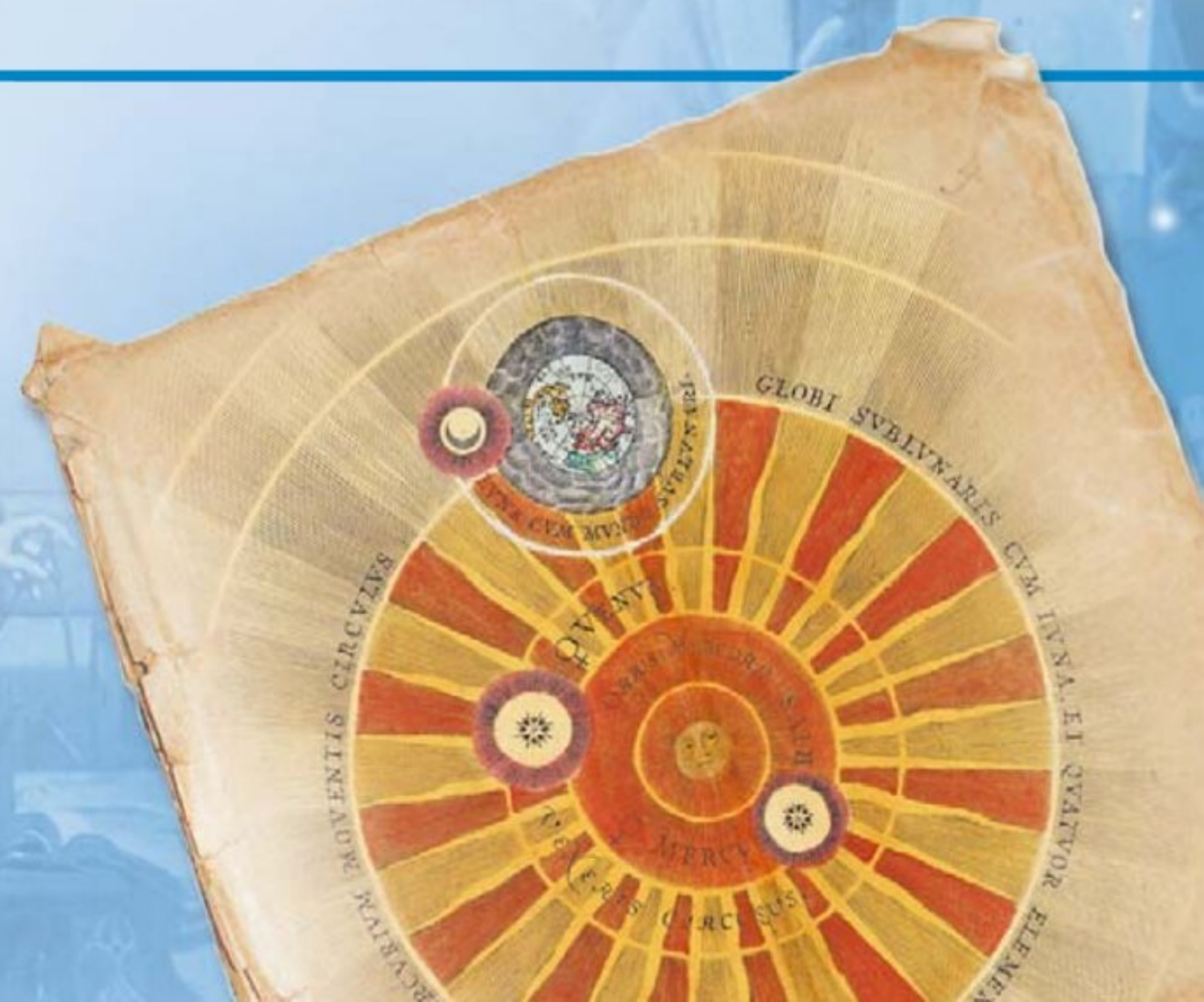
С древних времён люди любовались звёздным небом, под звёздами загадывали желания, объяснялись в любви, рождались и умирали. Наиболее любознательные умы пытались понять, сколько звёзд на небе, как далеко они от нас. Потом придумали телескоп, чтобы лучше видеть звёзды. Люди искали созвездия на небе и называли эти созвездия красивыми именами. По звёздам ориентировались в своих путешествиях и даже составляли гороскопы. Вероятно, многие из вас тоже смотрели на тысячи и тысячи звёзд в ночном небе и задавали себе вопрос: «Откуда всё взялось и как устроена наша Вселенная?»

Учёные тоже смотрят на звёздное небо. Они вооружены мощными телескопами, и видят сотни миллиардов галактик и звёздных скоплений, и знают, что каждая из галактик содержит сотни миллиардов звёзд. Они видят, как взрываются старые звёзды и рождаются новые, и всё во Вселенной находится в постоянном движении. И конечно, учёных волнуют вопросы: «Из чего состоят звёзды и планеты? Что такое чёрные дыры и квазары? Что такое тёмная материя и тёмная энергия?» Они пытаются понять, как образовался наш мир, сколько ему лет и каковы его размеры в пространстве.

Современные представления о пространстве, времени и Вселенной берут начало от создания А. Эйнштейном общей теории относительности, которая увидела свет сто лет назад, в 1916 г. По представлениям Эйнштейна, свойства пространства остаются постоянными во времени. В 1922 г. наш соотечественник А. А. Фридман показал, что существуют такие решения гравитационных уравнений Эйнштейна, согласно которым свойства пространства зависят от времени, и выдвинул гипотезу о том, что наша Вселенная расширяется. Из этой гипотезы следовал важный вывод, что в самом начале вся материя Вселенной была сосредоточена в некотором небольшом объёме, из которого и началось расширение. Причиной такого расширения мог стать взрывной процесс.

Следующий шаг, сравнимый с вкладом Коперника, сделал американский астроном Эдвин Хаббл, который в 20-е гг. прошлого столетия начал работать на самом крупном астрономическом телескопе того времени. Тогда большинство учёных были уверены, что Вселенная состоит из одной галактики — Млечного Пути. Хаббл опроверг это утверждение, открыв иные галактики, расположенные за пределами нашей галактики — Млечного Пути. Это открытие коренным образом изменило картину мира. Изучив движение галактик, Хаббл экспериментально обнаружил, что Вселенная расширяется, причём, чем больше расстояния между двумя галактиками, тем больше скорость их разлёта друг от друга. Эту зависимость сейчас называют законом Хаббла. Благодаря открытию Хаббла теория расширяющейся Вселенной получила признание.

В 1948 г. вышла работа нашего соотечественника Г. А. Гамова о горячей Вселенной, построенная на основе теории Фридмана. По Фридману, в начале был взрыв очень плотного вещества, из которого через миллиарды лет образовались тела Вселенной:



галактики, звёзды, планеты, наше Солнце и наша Земля. Гамов добавил к этому, что первичное вещество было не только очень плотным, но и очень горячим. Идея Гамова состояла в том, что в этом горячем и плотном веществе ранней Вселенной происходили ядерные реакции и в этом «ядерном котле» были за несколько минут синтезированы лёгкие химические элементы. Один из выводов этой теории — предсказание космического фона излучения, которое должно существовать во Вселенной со времён Большого взрыва, и температура этого излучения в наше время близка к абсолютному нулю. В 1964 г. американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вилсон открыли космический фон излучения и измерили его температуру. Она оказалась равной 3 К, как предсказал в одной из своих статей Гамов. Сегодня это излучение называют реликтовым. Таким образом, теория Гамова получила экспериментальное подтверждение.

Разнообразие размеров тел и расстояний между объектами в нашей Вселенной, температур и давлений, соответствующих различным физическим процессам, не может не поражать воображение. Например, расстояние от Земли до Солнца составляет 150 млн км или 150 000 000 000 м, а размеры видимой части Вселенной — это величина, которую можно описать единицей с 26 нулями (10^{26}) метров. Если говорить о давлении, то по сравнению с нормальным атмосферным давлением на Земле, равным примерно 1 бару, давление в нейтронной звезде составляет около 10^{26} бар (единица с 26 нулями). Вообще физические величины, описывающие состояние вещества в привычных нам земных условиях, являются очень редкими для нашей Вселенной. Около 98% материи, которую мы видим, находится в сильно сжатом (плазменном) состоянии — звёзды, планеты, чёрные дыры и т. д.

Огромный интерес для учёных представляет состав вещества, из которого состоит Вселенная. Первые указания на наличие какого-то неизвестного науке вещества во Вселенной появились в середине 30-х гг. XX в. в работах швейцарского астронома Фрица Цвикки. В 70-е гг. XX в. были получены точные измерения, результатом которых стало признание научным сообществом существования тёмной материи — вещества, которое мы можем обнаружить путём различных астрономических измерений и вычислений, но про которое мы пока знаем очень мало. Ещё одна загадка Вселенной — тёмная энергия. Этим термином учёные называли ещё одну компоненту, наличие которой подтверждается расчётами и моделями, но о которой мы почти ничего не знаем. Современные представления о составе Вселенной говорят, что тёмная энергия составляет 70% всего вещества, тёмная материя — 25% и только 5% — то вещество, которое мы знаем.

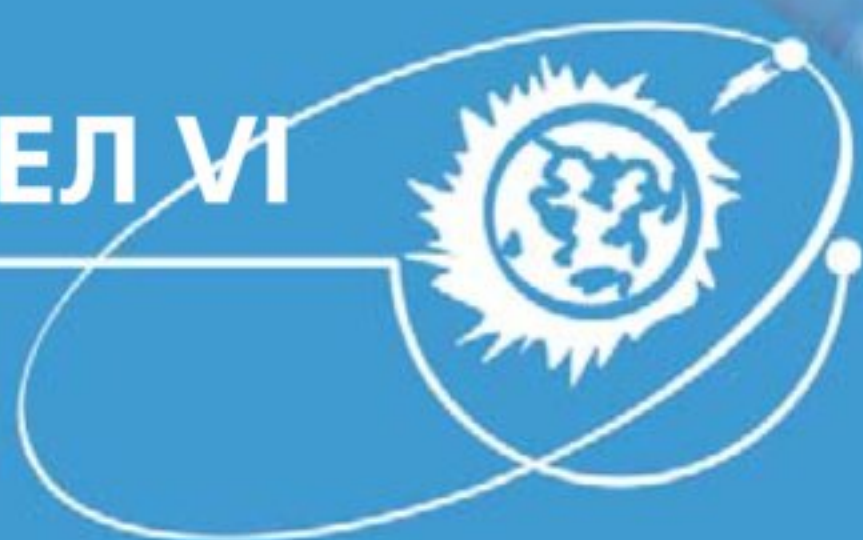
В нашей Солнечной системе масса всех планет составляет около 1% от массы Солнца. Это соотношение показывает, насколько удивительно редкими во Вселенной являются условия привычной нам земной жизни. Удивительным является и то, что все мы состоим из атомов элементов, которые образовались в звёздах. В человеческом организме содержится порядка 10^{30} атомов, что в тысячу раз больше, чем число звёзд в наблюдаемой части Вселенной. Поэтому связь между макрокосмосом и микрокосмосом многогранна и чрезвычайно интересна.

Глава 11

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

- РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
О СТРОЕНИИ МИРА.
ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ
- ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ
И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ В АСТРОНОМИИ
- СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
- СОЛНЦЕ
- ЗВЁЗДЫ
- СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД
- ГАЛАКТИКИ
- РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ
ВСЕЛЕННОЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ VI



АСТРОНОМИЯ (ВСЕЛЕННАЯ)

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Конечная цель физики — описать Вселенную одним-единственным уравнением, которое могло бы уместиться на майке.

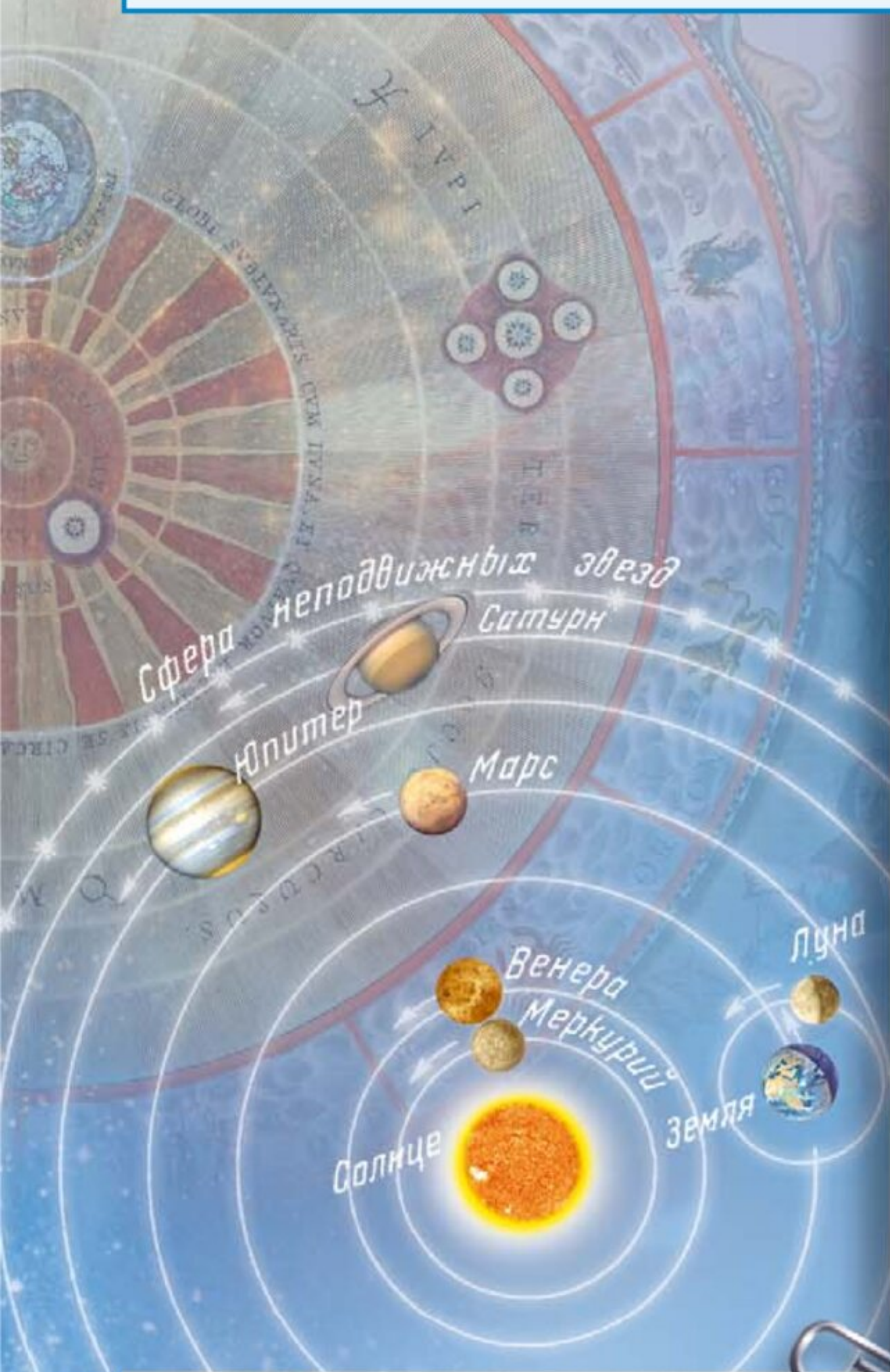
Л. Ледерман

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как развивались представления о строении мира.
- Законы Кеплера для движения планет.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое система отсчёта?
- Что такое линейная скорость?
- Что такое период обращения?



Древнегреческий астроном Аристарх Самосский, живший в III в. до н.э., впервые выдвинул гипотезу о том, что все планеты, в том числе и Земля, вращаются вокруг Солнца. Также он определил расстояние до Луны, вычислил размеры Солнца, которое, по его расчётам, оказалось более чем в 300 раз больше Земли по объёму. Однако гениальные идеи Аристарха не получили распространения, и человечество более полутора тысяч лет было уверено, что Земля — это неподвижный центр мира.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МИРА. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

С глубокой древности люди пытались объяснить устройство того большого мира, в котором мы живём, понять место человечества во Вселенной. Этот путь был очень непростым и подчас весьма драматичным.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МИРА В древности Земля считалась центром мироздания. Было естественно считать, что вокруг неподвижной Земли вращаются другие небесные тела. *Геоцентрическая* (от греч. *geo* — Земля) система мира — это учение о строении мира, согласно которому центром Вселенной является Земля с обращающимися вокруг неё Луной, Солнцем и планетами. В IV в. до н.э. Аристотель обобщил накопленные на то время знания: Земля является центром Вселенной, она неподвижна и имеет сферическую форму. Картина мира Аристотеля на многие столетия определила господство геоцентрической системы в астрономии. Математическое описание геоцентрической системы дал древнегреческий учёный Клавдий Птолемей. В его системе движение Луны, Солнца и звёзд вокруг Земли представлялось круговым, а остальные планеты двигались петлеобразно. Птолемей смог достаточно точно для своего времени составить таблицы для определения положения планет на небе. Но по мере накопления новых астрономических наблюдений геоцентрическая система требовала всё больших доработок и усложнений.

В 1543 г. вышла знаменитая книга польского учёного Николая Коперника «Об обращениях небесных сфер», совершившая настоящую революцию в человеческом мышлении. Он разработал *гелиоцентрическую* (от греч. *gelios* — Солнце) систему мира. *Гелиоцентрическая система мира* — это учение о строении мира, согласно которому Земля, вращающаяся вокруг своей оси, вместе с другими планетами обращается вокруг Солнца. Коперник доказывал, что именно вращением Земли и её обращением вокруг Солнца объясняются смена дня и ночи, смена времён года и другие явления.

Галилей поддержал Коперника и изложил гелиоцентрическую картину мира в своей книге «Диалог о двух системах мира».



Датский астроном Тихо Браге (1546—1601) не был сторонником системы мира Коперника, а предложил свою систему — *геогелиоцентрическую*. В системе мира Тихо Браге Солнце, Луна и звёзды обращались вокруг неподвижной Земли, а вокруг Солнца обращались все остальные планеты. Его теория стала соединением учений Птолемея и Коперника.

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ Предложенная Коперником гелиоцентрическая модель мира вдохновила учёных на поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет. Такие закономерности были обнаружены в начале XVII в. немецким астрономом И. Кеплером, который в своих исследованиях опирался на наблюдения датского астронома Тихо Браге. Однако сам Кеплер не смог объяснить открытые им закономерности в движении планет.

Первый закон Кеплера описывает траекторию движения планет: орбита любой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Форму эллипса характеризует его *эксцентриситет* — отношение расстояния c от центра эллипса до его фокуса к большой полуоси a (половина наибольшего диаметра): $e = c/a$. При $e = 0$ ($c = 0$) эллипс становится окружностью. Чем больше e , тем эллипс сильнее вытянут. По эллиптическим орбитам движутся не только планеты, но и кометы и астероиды. Все планеты Солнечной системы движутся по орбитам, близким к круговым. Например, эксцентриситет орбиты Земли $e = 0,017$, а эксцентриситет орбиты кометы Галлея $e = 0,967$.

Второй закон Кеплера: каждая планета движется так, что радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади. *Радиус-вектором* планеты называют отрезок, соединяющий Солнце и планету в данный момент времени. Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется *перигелием*, наиболее удалённая от Солнца точка — *афелием*. Планеты движутся вокруг Солнца неравномерно. В перигелии их линейная скорость максимальна, а в афелии — минимальна, т. е., чем ближе планета находится к Солнцу, тем быстрее она движется. Таким образом, второй закон Кеплера описывает изменение скорости движения планет.

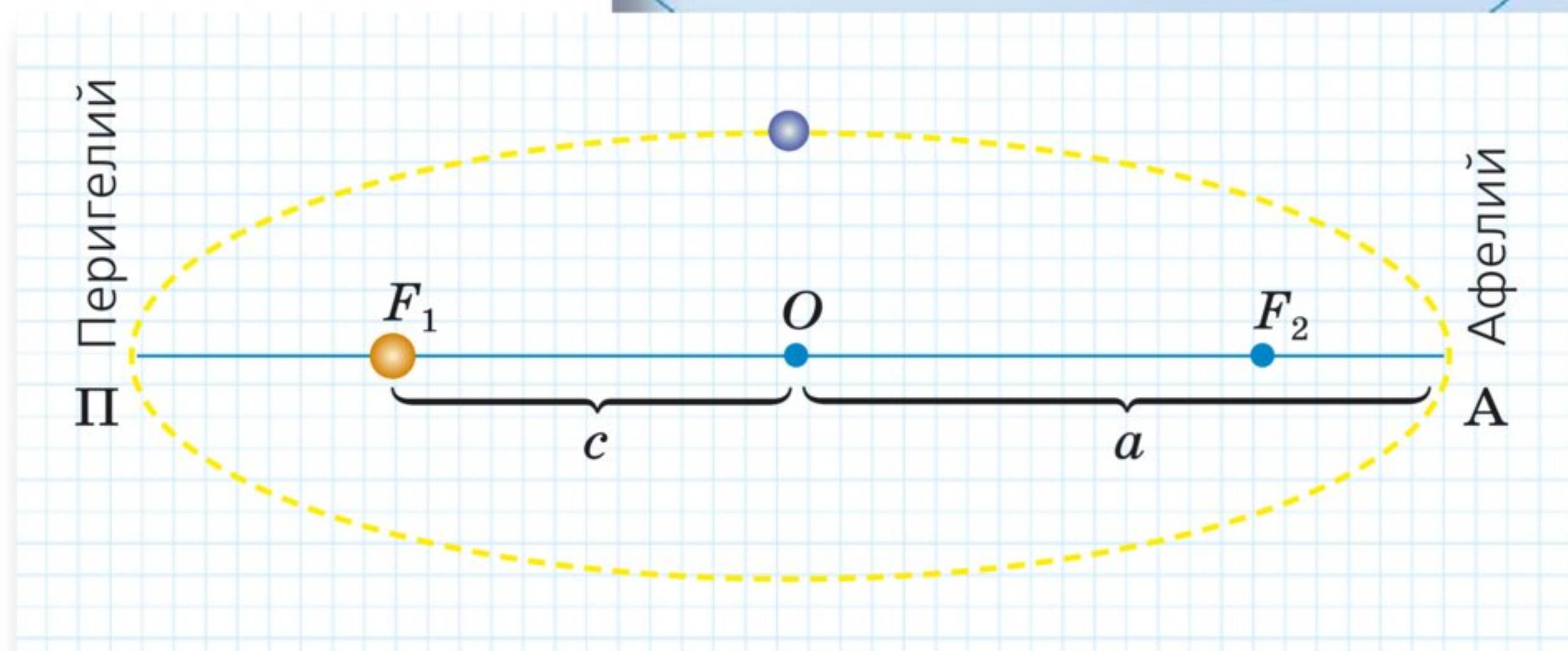
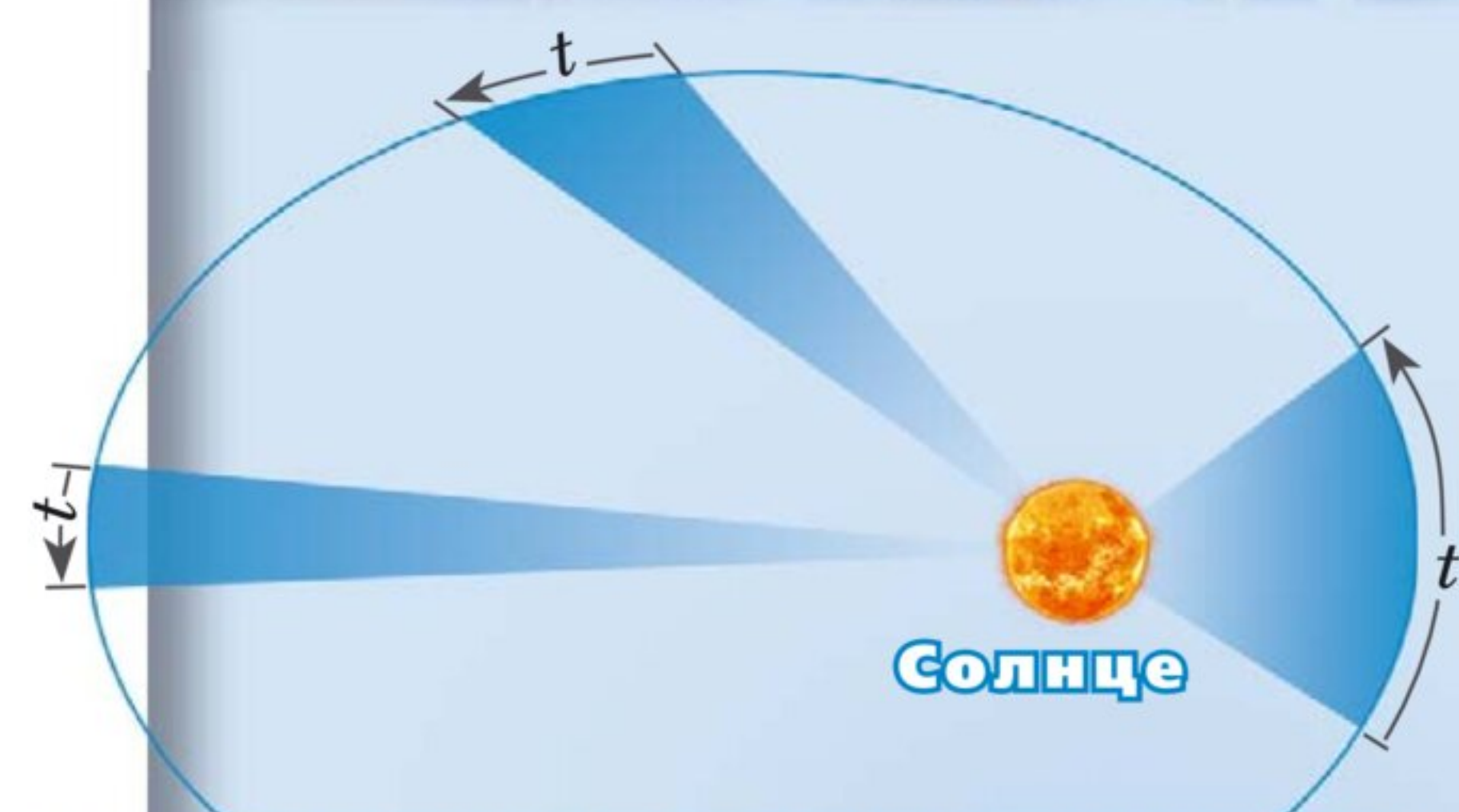
Третий закон Кеплера: квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет вокруг Солнца, a_1 и a_2 — большие полуоси их орбит.

Этот закон позволяет сравнить орбиты планет между собой. Из третьего закона Кеплера следует, что, чем дальше планета находится от Солнца, тем больше её период обращения, так как больше длина её орбиты и меньше линейная скорость движения планеты. Поэтому с удалением планеты от Солнца увеличивается время, необходимое для полного оборота планеты при её движении по орбите.

Третий закон Кеплера можно также применять для планет и их естественных и искусственных спутников.



Позднее И. Ньютон, используя закон всемирного тяготения, доказал, что в третий закон Кеплера должны входить и массы взаимодействующих тел (планет). Таким образом, обобщённый третий закон Кеплера звучит так: квадраты периодов обращения планет, умноженные на сумму масс Солнца и каждой из планет, относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2 (M + m_1)}{T_2^2 (M + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где M — масса Солнца, m_1 и m_2 — массы планет. Если пренебречь массами планет в сравнении с массой Солнца, получится формула третьего закона Кеплера.

ВОПРОСЫ:

- В чём отличие системы мира Коперника от системы мира Птолемея?
- Как формулируются законы Кеплера?
- Как изменяется скорость движения планеты при движении по орбите?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое созвездия.
- Как описать положение небесного тела в пространстве.
- Как измеряют расстояния в астрономии.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое широта и долгота в географии?
- Что такое скорость света и каково её значение?



Вероятно, самой известной звездой является Полярная звезда. В отличие от других звёзд, Полярная звезда практически не меняет своего местоположения на небе, указывая направление на север. Вследствие суточного вращения Земли вокруг своей оси можно наблюдать, что остальные звёзды движутся на небе вокруг Полярной звезды.

Чтобы найти Полярную звезду на звёздном небе, надо сначала найти созвездие Большой Медведицы, которое похоже на большой ковш, состоящий из семи ярких звёзд. Затем через две крайние звёзды ковша мысленно провести прямую линию и отсчитать на ней пять расстояний между этими звёздами. В конце этого отрезка будет видна яркая звезда. Это и есть Полярная звезда, которая принадлежит созвездию Малой Медведицы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ В АСТРОНОМИИ

Невооружённым глазом на небе можно рассмотреть до 3000 звёзд в каждом полушарии. Местоположение звёзд астрономы определяют, располагая их в созвездия.

СОЗВЕЗДИЯ Группы звёзд, видимые на определённых участках звёздного неба, — **созвездия**. Ещё астрономы древности заметили, что группы звёзд образуют на небе определённые конфигурации. Они провели между этими звёздами условные линии и на их основе нарисовали воображаемые фигуры — героев мифов, зверей, инструменты и т. д.

В настоящее время астрономы насчитывают 88 созвездий. Из них 37 находится в Северном полушарии.

Объединение звёзд в созвездия весьма условно, так как на самом деле звёзды могут быть расположены достаточно далеко друг от друга и никак не связаны между собой. Например, звёзды ковша Большой Медведицы кажутся одинаково удалёнными от Земли. На самом деле первая звезда ручки ковша — Бенетнаш — находится примерно в 3 раза дальше от нас, чем остальные.



Древние астрономы заметили, что Луна и Солнце не остаются всё время в одном и том же созвездии, а движутся по небу, переходя из одного созвездия в другое.

Эти созвездия, через которые проходят пути Солнца и Луны, называли зодиакальными. В Древней Греции выделяли 12 зодиакальных созвездий. Хотя в настоящее время Солнце проходит также и через 13-е созвездие — созвездие Змееносца, но его к зодиакальным созвездиям не причисляют.

ОПИСАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ Чтобы описать положение небесного тела (звезды, планеты и т. д.) в пространстве, астрономы используют следующие характеристики: координаты тела на небесной сфере и расстояние до него. *Небесной сферой* называют воображаемую сферическую поверхность произвольного радиуса, на которую проецируются небесные тела. Наблюдатель находится в центре сферы, причём из-за малых размеров Земли по сравнению с расстояниями до звёзд наблюдателей в разных точках земной поверхности можно считать находящимися в центре небесной сферы. Положение точки на земной поверхности описывают географическими координатами — широтой и долготой. Система координат на небесной сфере аналогична географическим координатам на земной поверхности. Рассмотрим основные линии небесной сферы. *Ось мира* — воображаемая линия, проходящая через центр сферы и параллельная оси вращения Земли. Точки пересечения небесной сферы с осью мира

называют *полюсами мира*. Так же как и на Земле, существуют Северный полюс мира и Южный полюс мира. Вблизи Северного полюса мира находится Полярная звезда. Плоскость, проходящая через центр небесной сферы перпендикулярно оси мира (и параллельно плоскости экватора Земли), образует окружность большого круга — *небесный экватор*, который делит небесную сферу на два полушария: Северное и Южное. Пусть от наблюдателя исходят два луча к разным точкам небесной сферы. Угол, заключённый между этими лучами, называют *угловым расстоянием*.

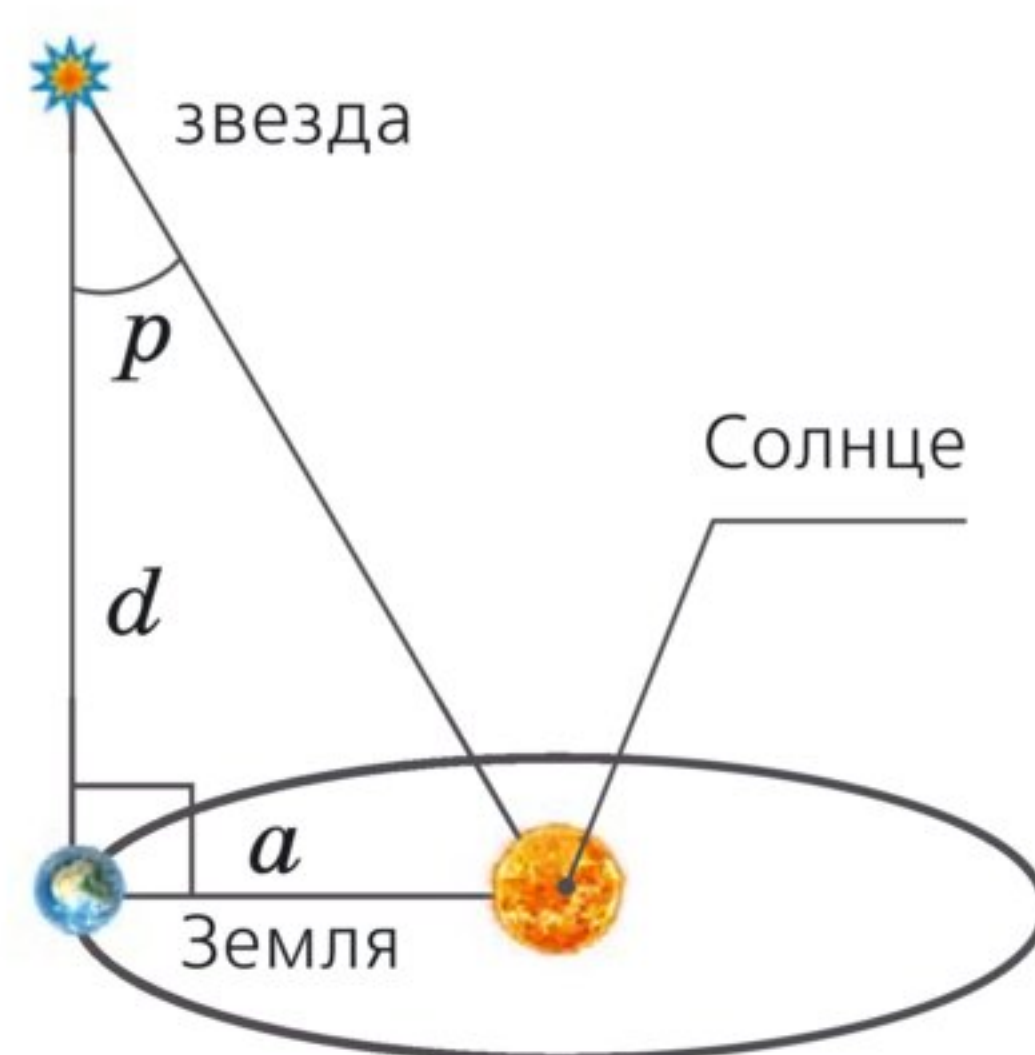
Одной из небесных координат является *склонение* (обозначают буквой δ) — это угловое расстояние между небесным телом и небесным экватором. Склонение аналогично географической широте. Оно может принимать значения от -90° до 90° . Склонение считают положительным для небесных тел, расположенных в Северном полушарии, и отрицательным для небесных тел, расположенных в Южном полушарии.

Второй небесной координатой, аналогичной географической долготе, является *прямое восхождение* (обозначается буквой α) — угловое расстояние между кругом склонения и точкой весеннего равноденствия (точка на небесной сфере, в которой Солнце бывает 21 марта). Прямое восхождение отсчитывается в направлении, противоположном суточному вращению Земли.

Расстояния до ближайших звёзд определяют методом параллакса. **Параллаксом (годовым параллаксом)** называется угол p , под которым со звезды был бы виден радиус a земной орбиты, расположенный перпендикулярно направлению на звезду. Если этот угол удастся измерить, то расстояние d до звезды вычисляется по формуле

$$d = \frac{a}{\sin p}.$$

Для всех ближайших звёзд угол p весьма мал (меньше $1''$).

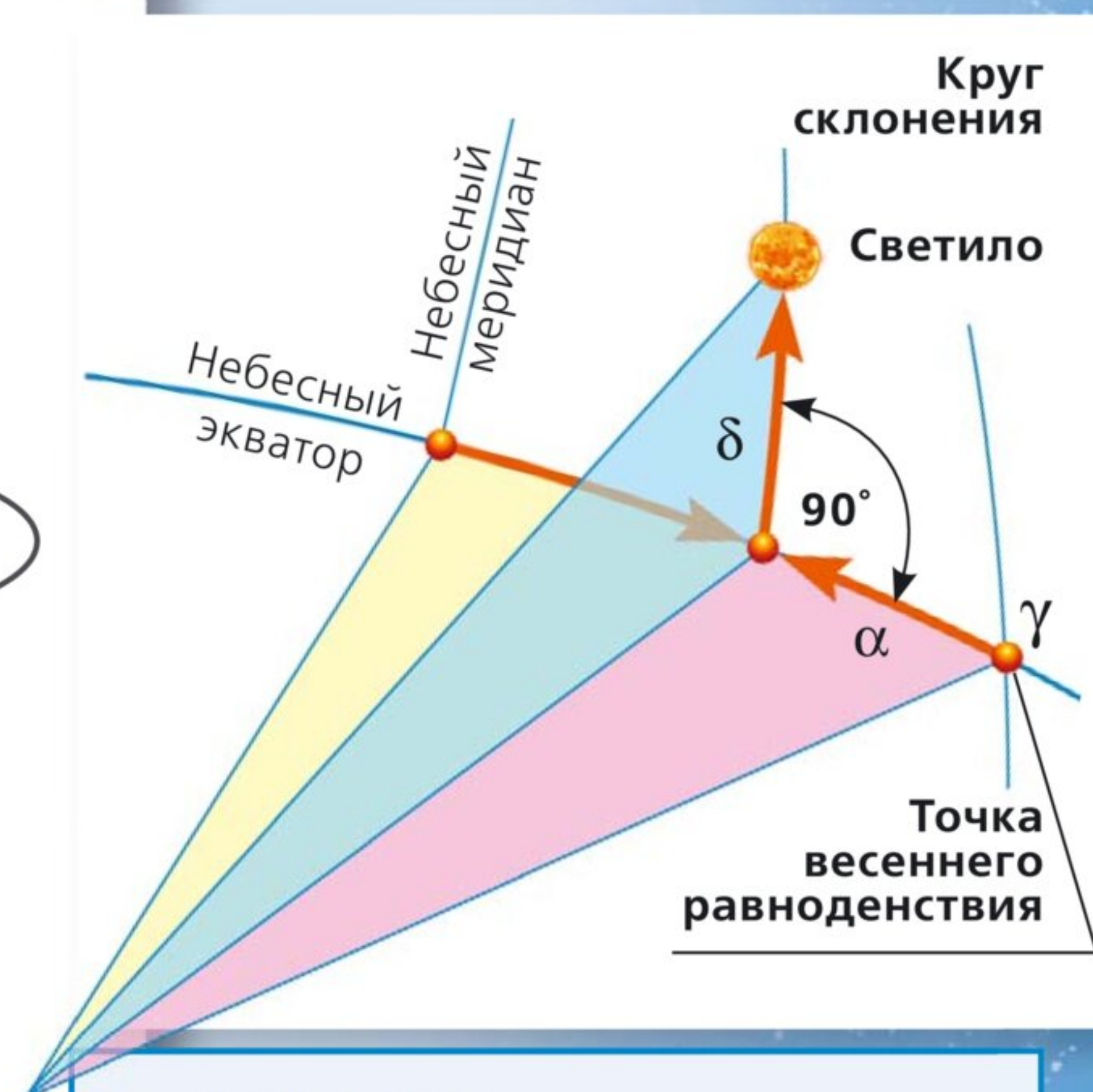
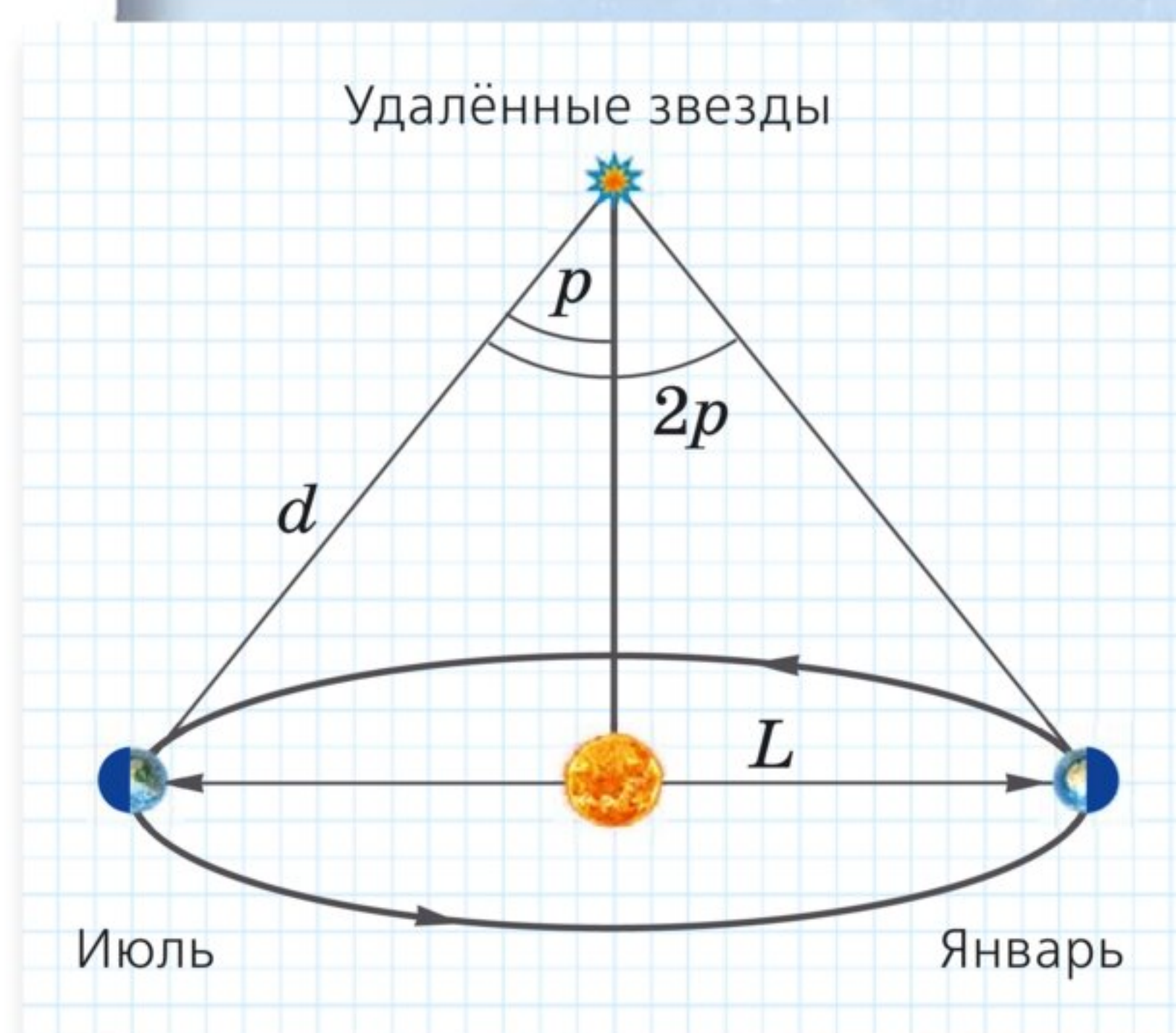
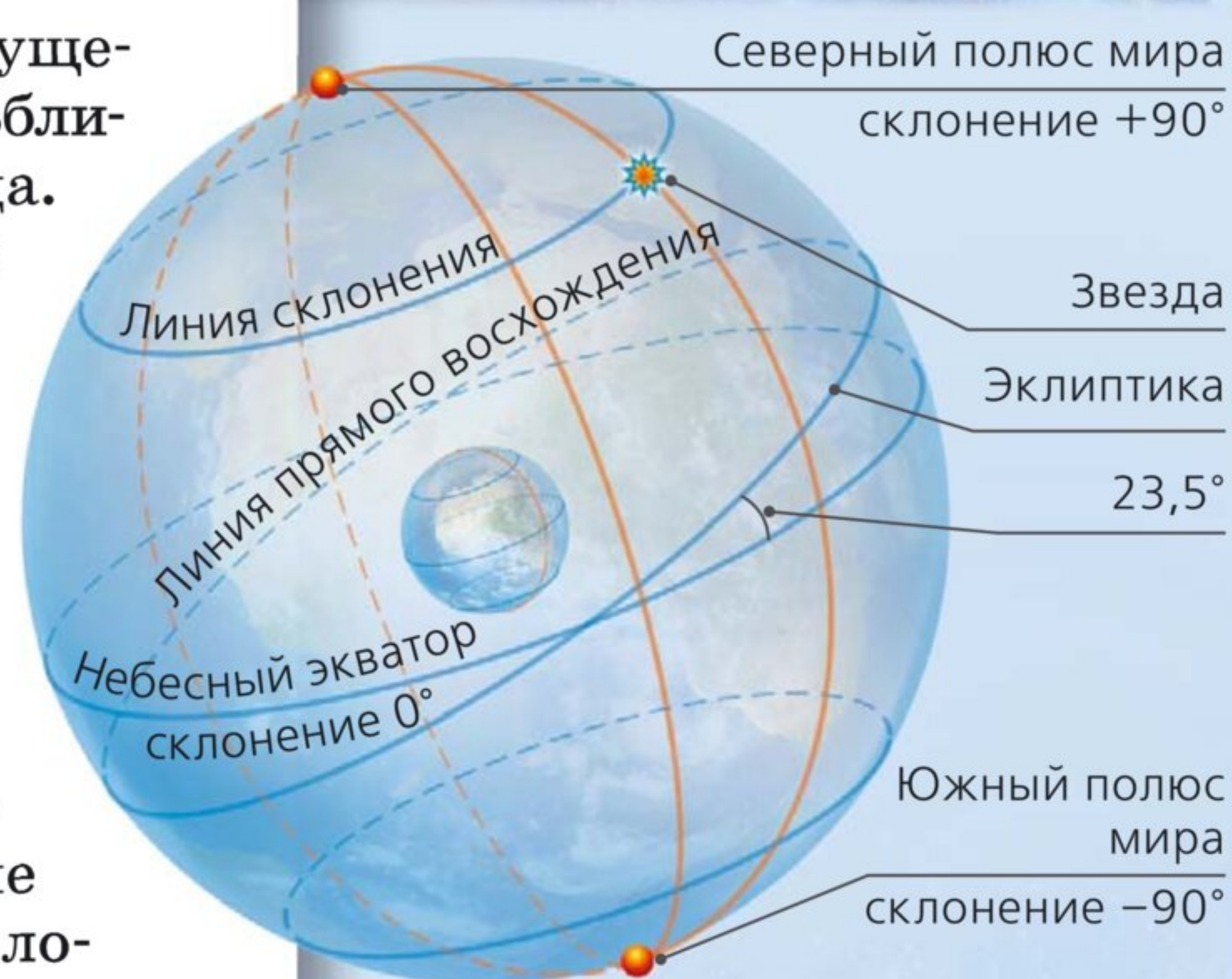


ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ В АСТРОНОМИИ Расстояния во Вселенной очень велики, поэтому астрономы для выражения расстояний между звёздами, галактиками и другими небесными телами используют такие единицы, как астрономическая единица, световой год и парсек.

Астрономическая единица (а. е.) — это среднее расстояние от Земли до Солнца: $1 \text{ а. е.} \approx 150\,000\,000 \text{ км}$.

Световой год (св. год) — это расстояние, которое свет проходит за земной год: $1 \text{ св. год} \approx 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км}$.

Парсек (образовано от сокращений слов «параллакс» и «секунда») — расстояние до объекта, параллакс которого равен одной угловой секунде ($1/3600$ часть градуса): $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$.



ВОПРОСЫ:

- Как определяют положение небесных тел на небесной сфере?
- Как определяют параллакс?
- Какие единицы длины используют в астрономии?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как устроена Солнечная система.
- Как возникла Солнечная система.
- Характеристики планет и малых тел Солнечной системы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое гравитационные силы?
- По каким законам движутся небесные тела в Солнечной системе?

В 2016 г. учёные с помощью расчётов и анализа движения малых небесных тел в далёком космосе выдвинули гипотезу о существовании девятой планеты Солнечной системы. Согласно расчётам её орбита находится за орбитой Нептуна и удалена на 200 а.е. от Солнца, а её масса в 5—10 раз превышает массу Земли. Увидеть планету в телескоп пока не удалось.

Венеру очень легко наблюдать с Земли. Иногда она сближается с Землёй на расстояние не более 45 млн км. Кроме того, большая плотность облаков отражает свет от Солнца, что делает планету очень яркой. Обычно Венера видна на небе незадолго до восхода или через некоторое время после захода Солнца. Поэтому её называют Утренней или Вечерней звездой.

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Наша планета Земля входит в систему планет и других небесных тел, вращающихся вокруг звезды, названной Солнцем. Именно Солнце, масса которого в 333 000 раз больше массы Земли и почти в 750 раз больше суммарной массы всех планет, управляет движением больших и малых тел Солнечной системы.

КАК УСТРОЕНА СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА В центре Солнечной системы находится Солнце. Вокруг Солнца обращаются восемь больших планет с их спутниками, несколько карликовых планет, сотни тысяч астероидов, несколько тысяч комет, множество метеорных тел и космическая пыль. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении и почти в одной плоскости. Они расположены на разных расстояниях от Солнца в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. По физическим характеристикам планеты делят на две группы: планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и планеты юпитерианской группы, или планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун).

В Солнечной системе существуют две области, заполненные малыми небесными телами, — это пояс астероидов, расположенный между орбитами Марса и Юпитера, и пояс Койпера, расположенный за орбитой Нептуна.



Согласно гипотезе Солнечная система начала образовываться 5 млрд лет назад из вращающегося газопылевого облака. Под воздействием сил гравитации облако превратилось во вращающийся диск, а в его центре сосредоточилась основная масса вещества, и образовалось центральное горячее ядро. При температуре в десятки миллионов градусов в ядре начались термоядерные реакции, и вспыхнула новая звезда — Солнце. Под воздействием тяготения образовавшегося Солнца частички пыли и газа обращались вокруг Солнца по разным орбитам. В результате взаимного притяжения этих частиц образовались планеты.

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ имеют схожее строение, небольшие размеры и массы. Они обладают сравнительно высокой средней плотностью (средняя плотность Земли $5,5 \text{ г/см}^3$) и состоят в основном из оксидов и других соединений тяжёлых химических элементов: железа, алюминия, кремния, магния и др. Две из планет земной группы (Земля и Марс) имеют спутники, а Венера, Земля и Марс имеют атмосферы, которые формируют погоду на планетах. Планеты земной группы расположены очень близко друг к другу. Радиус всей этой области меньше расстояния между орбитами Юпитера и Сатурна.

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ По сравнению с планетами земной группы планеты-гиганты имеют большие размеры и массы, но меньшую среднюю плотность. Так, самая большая планета Солнечной системы — Юпитер, его диаметр в 11 раз больше земного, а масса в 2,5 раза больше общей массы всех остальных планет. Средняя плотность Юпитера составляет всего $1,3 \text{ г/см}^3$.

Планеты-гиганты состоят в основном из водорода и гелия, а также метана и аммиака. Все планеты-гиганты имеют большую скорость вращения вокруг своей оси. Они имеют десятки спутников и системы колец.

АСТЕРОИДЫ Малые небесные тела размерами от нескольких метров до нескольких тысяч километров — *астероиды* (в пер. с греч. — подобный звезде). Они имеют неправильную форму и не имеют атмосферы, хотя у некоторых из них есть спутники. Большинство астероидов Солнечной системы находится в поясе астероидов и в поясе Койпера. В результате столкновений с другими астероидами или под действием гравитационного взаимодействия со спутниками или планетами привычные орбиты астероидов могут изменяться. Учёные постоянно следят за астероидами, которые пересекают земную орбиту, а также за околоземными астероидами, которые могут представлять опасность.

КОМЕТЫ Небесные тела, состоящие из твёрдых частиц, пыли и льда, — *кометы* (в пер. с греч. — волосатый, хвостатый). Они движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам вокруг Солнца. На больших расстояниях от Солнца кометы невидимы для человеческого глаза. При приближении к Солнцу лёд тает и частично испаряется, превращаясь в газ и высвобождая частички пыли. Газопылевое облако отражает солнечный свет, и комета становится видимой. Твёрдую часть кометы называют *ядром*, а газопылевое облако вокруг ядра — *комой*. Под действием давления солнечного света вещество комы переходит в хвост — слабая светящаяся полоса, направленная в противоположную от Солнца сторону. Некоторые кометы могут иметь не один, а два или три отдельных хвоста.

МЕТЕОРЫ И МЕТЕОРИТЫ *Метеорные тела* — это небесные тела диаметром не больше 30 м. Малые метеорные тела при попадании в земную атмосферу сгорают, оставляя в небе узкий светящийся след — *метеор*. Часто метеоры группируются в *метеорные потоки*, которые можно наблюдать в определённое время года.

Крупные метеорные тела — метеориты — достигают поверхности Земли. На месте падения метеоритов образуются кратеры. Самым крупным кратером на Земле считается кратер Вредефорт в Южной Африке. Его диаметр около 300 км, а возраст около 2 млрд лет.

В 2006 г. в рамках классификации небесных тел, обращающихся вокруг Солнца, был принят термин «карликовая планета». Карликовые планеты намного меньше, чем планеты (даже меньше спутника Земли — Луны), но имеют достаточную массу, чтобы под действием сил гравитации их форма стала близка к сферической. В отличие от больших планет карликовые планеты не могут расчистить свою орбиту от других небесных объектов. К карликовым планетам относятся Плутон (до 2006 г. считался девятой планетой), Церера (до 2006 г. считался астероидом) и др.



Изучение структуры, состава и свойств метеоритов представляет большой интерес. Эти исследования помогают разобраться в процессах образования и эволюции Солнечной системы и планет, в том числе и Земли. В некоторых из метеоритов были обнаружены и органические соединения.

ВОПРОСЫ:

- По каким характеристикам планеты делят на две группы?
- Что такое астероиды?
- Чем объясняется образование хвоста кометы?
- Чем отличаются метеоры от метеоритов?

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

ЗВЕЗДА СОЛНЦЕ

ПЛАНЕТНАЯ СИСТЕМА

ПЛАНЕТЫ

СПУТНИКИ
ПЛАНЕТ

МАЛЫЕ ТЕЛА

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ
ГАЗ И ПЫЛЬ

БОЛЬШИЕ
ПЛАНЕТЫ

КАРЛИКОВЫЕ
ПЛАНЕТЫ

АСТЕРОИДЫ

КОМЕТЫ

МЕТЕОРОИДЫ
(МЕТЕОРНЫЕ ТЕЛА)

ПЛАНЕТЫ
ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

ПЛАНЕТЫ-
ГИГАНТЫ

ПЛАНЕТА	Количество спутников
	0
	0
	1
	2
	67
	62
	27
	14

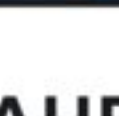
ПЛАНЕТА	Средний радиус, км
	2439,7 км
	6051,8 км
	6371 км
	3390 км
	69 911 км
	58 232 км
	25 362 км
	24 622 км

МЕРКУРИЙ ВЕНЕРА ЗЕМЛЯ МАРС ЮПИТЕР

ПОЯС АСТЕРОИДОВ

ПЛАНЕТА	Расстояние до Солнца в а.е. (1 а.е. = 150 000 000 км)
	0,4 а.е.
	0,7 а.е.
	1,0 а.е.
	1,5 а.е.
	5,2 а.е.
	9,5 а.е.
	19,2 а.е.
	30,2 а.е.

ПЛАНЕТА	Период обращения вокруг Солнца, земных лет	Период вращения вокруг своей оси	Орбитальная скорость, км/с
	0,24	58 сут. 7 ч	47,9
	0,62	234 сут. 1 ч	35
	1,00004	23 ч 56 мин 4 с	29,8
	1,88	24 ч 37 мин 22 с	24,1
	11,87	9 ч 50 мин	13,07
	29,67	10 ч 14 мин	9,6
	84,05	10 ч 49 мин	6,8
	164,49	15 ч 48 мин	5,4

ПЛАНЕТА	Масса, кг	Масса в массах Земли
	$3,33 \cdot 10^{23}$	0,06
	$4,867 \cdot 10^{24}$	0,8
	$5,973 \cdot 10^{24}$	1
	$6,419 \cdot 10^{23}$	0,1
	$1,899 \cdot 10^{27}$	318
	$5,683 \cdot 10^{26}$	95
	$8,685 \cdot 10^{25}$	14,5
	$1,024 \cdot 10^{26}$	17

ПЛАНЕТА	Средняя температура на поверхности
	460 °C
	от -170 до 350 °C
	от -90 до 58 °C
	от -140 до 20 °C
	-140 °C
	-170 °C
	-220 °C
	-210 °C



Облако Оорта —
неисследованная область,
источник долгопериодических
комет

Пояс Койпера
в 20 раз шире и в 100 раз
массивнее
пояса астероидов

ПОЯС КОЙПЕРА

ОБЛАКО ООРТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каковы основные характеристики Солнца.
- Каково строение Солнца и его атмосферы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое гравитационные силы?
- Что такое термоядерные реакции?
- Какие существуют способы теплопередачи?

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА

Среднее расстояние до Земли	$1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Средний диаметр	$1,39 \cdot 10^9 \text{ м}$
Масса	$1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Средняя плотность	$1,4 \text{ г/см}^3$
Ускорение свободного падения на экваторе	$274 \text{ м/с}^2 = 27,96 \text{ g}$
Температура короны	$1,5 \cdot 10^6 \text{ К}$
Температура ядра	$1,35 \cdot 10^7 \text{ К}$

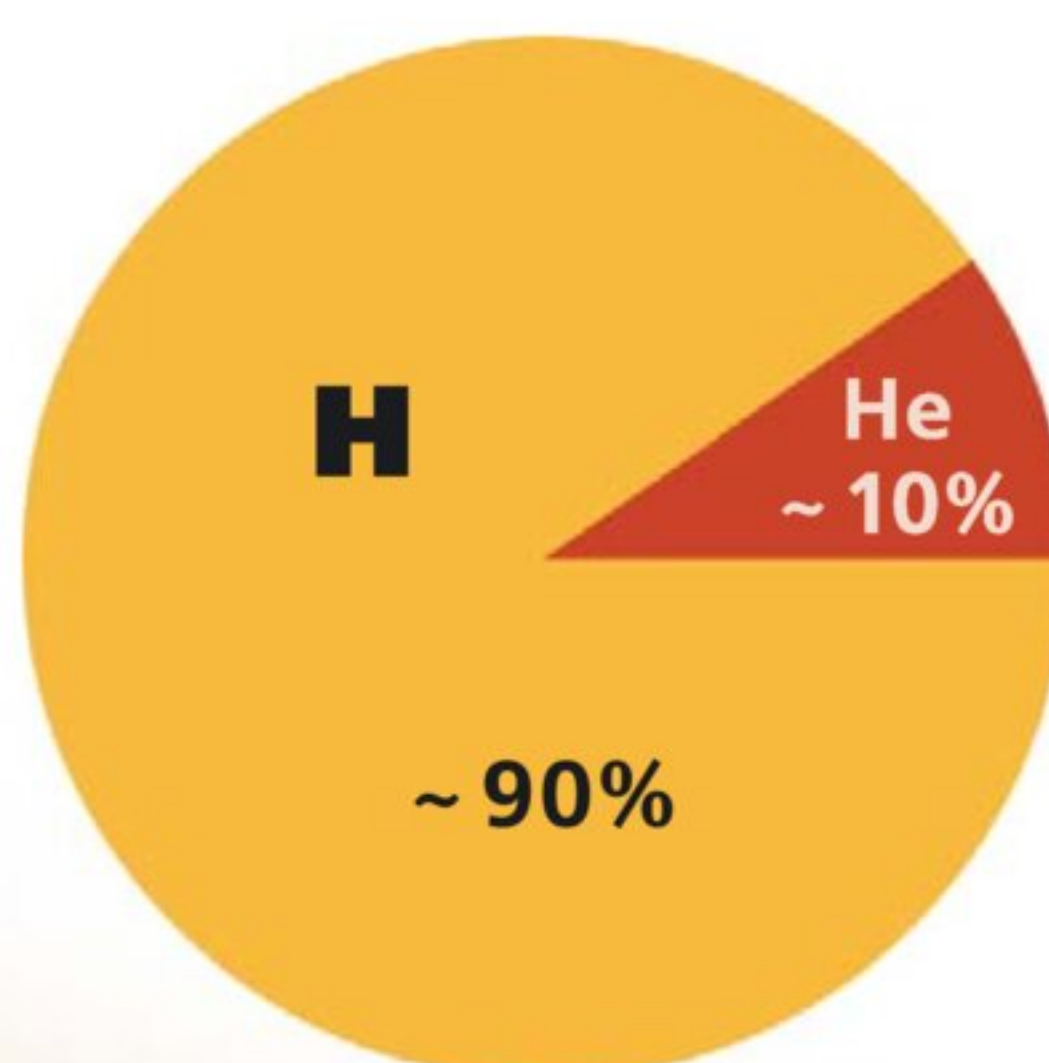
Солнце — центральная и единственная звезда нашей планетной системы. Без энергии Солнца не было бы жизни на Земле.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА

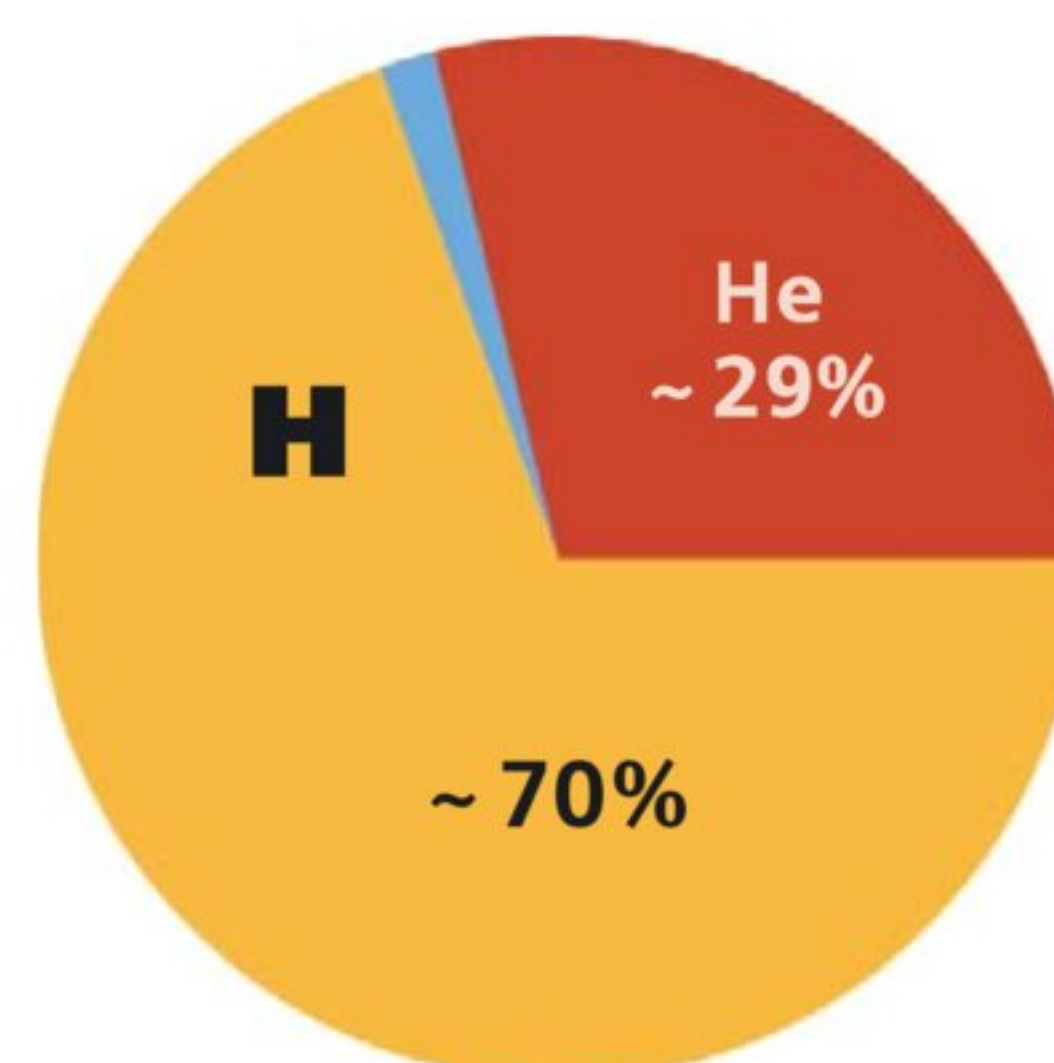
Солнце, как и все остальные звёзды, представляет собой шарообразное небесное тело, состоящее из раскалённого газа. Масса Солнца составляет 99,8% от массы всей Солнечной системы и в 109 раз превосходит диаметр Земли.

Количество приходящей от Солнца на Землю энергии характеризуют *солнечной постоянной*. Так называют энергию, проходящую за единицу времени через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам на расстоянии 1 а. е. от Солнца вне земной атмосферы. Солнечная постоянная оказалась равна $E_{\odot} = 1,37 \text{ кВт/м}^2$. Несмотря на название, солнечная постоянная не является неизменной во времени величиной. Она зависит от расстояния от Земли до Солнца, которое изменяется в течение года, и от изменения солнечной активности. Умножив солнечную постоянную на площадь поверхности сферы радиусом 1 а. е., получим мощность излучения Солнца: $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. Эта мощность сопоставима с мощностью 10^{17} современных АЭС.

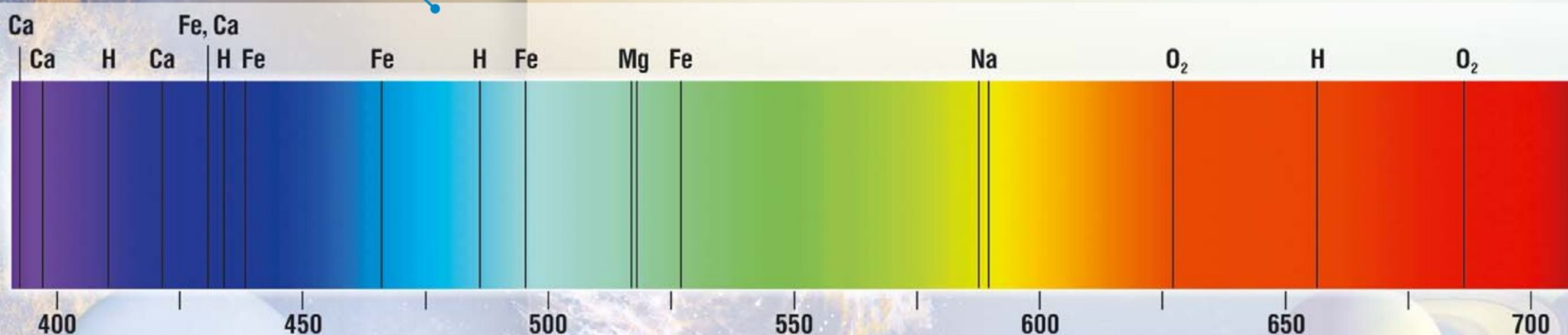
Химический состав Солнца учёные узнали с помощью спектрального анализа. Было установлено, что Солнце в основном состоит из водорода (74%) и гелия (24%), а также железа, никеля, кислорода и других элементов. Из-за высокой температуры солнечное вещество представляет собой ионизированный атомарный газ (плазму).



по числу атомов



по массе

СОСТАВ СОЛНЦА

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ СОЛНЦА О внутреннем строении Солнца можно узнать только на основе теоретического анализа, имея основные характеристики (масса, радиус и т. д.) и применяя законы физики. Солнце можно разделить на несколько областей. Центральную часть Солнца называют **ядром**. Здесь при очень высоком давлении ($2 \cdot 10^{18}$ Па), температуре ($1,5 \cdot 10^7$ К) и плотности (150 г/см^3) протекают термоядерные реакции. В результате превращения ядер атомов водорода в ядра атомов гелия выделяется колоссальная энергия, которая обеспечивает условия для последующего ядерного синтеза. Именно в ядре выделяется практически вся энергия, которая передаётся верхним слоям и поддерживает свечение Солнца. Теплопередача на Солнце происходит в основном путём конвекции и излучения.

Над ядром находится **зона лучистого переноса**, в которой энергия, выделенная ядром, передаётся к верхним слоям Солнца через поглощение и излучение веществом фотонов. Фотоны, постоянно переизлучаясь, меняют направление. Поэтому одному фотону, чтобы пройти эту зону, требуется порядка миллиона лет. По мере удаления от ядра плотность, температура и давление уменьшаются.

Следующую внешнюю область Солнца занимает **конвективная зона**, где перенос энергии происходит путём переноса самого вещества. Огромные потоки горячего газа поднимаются к поверхности, их температура постепенно уменьшается, а затем охлаждённый газ погружается к центру Солнца. Конвекционные потоки в этой зоне движутся со скоростью 1—3 м/с. Один полный цикл конвекции может занимать около миллиона лет.

В результате термоядерных реакций в ядре Солнца рождаются нейтральные элементарные частицы — нейтрино. Они слабо взаимодействуют с веществом, и, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, некоторые из них достигают Земли. Изучая эти частицы и наблюдая за ними, учёные получают информацию о процессах, происходящих внутри Солнца.

Масса Солнца:
 $1,99 \cdot 10^{30}$ кг

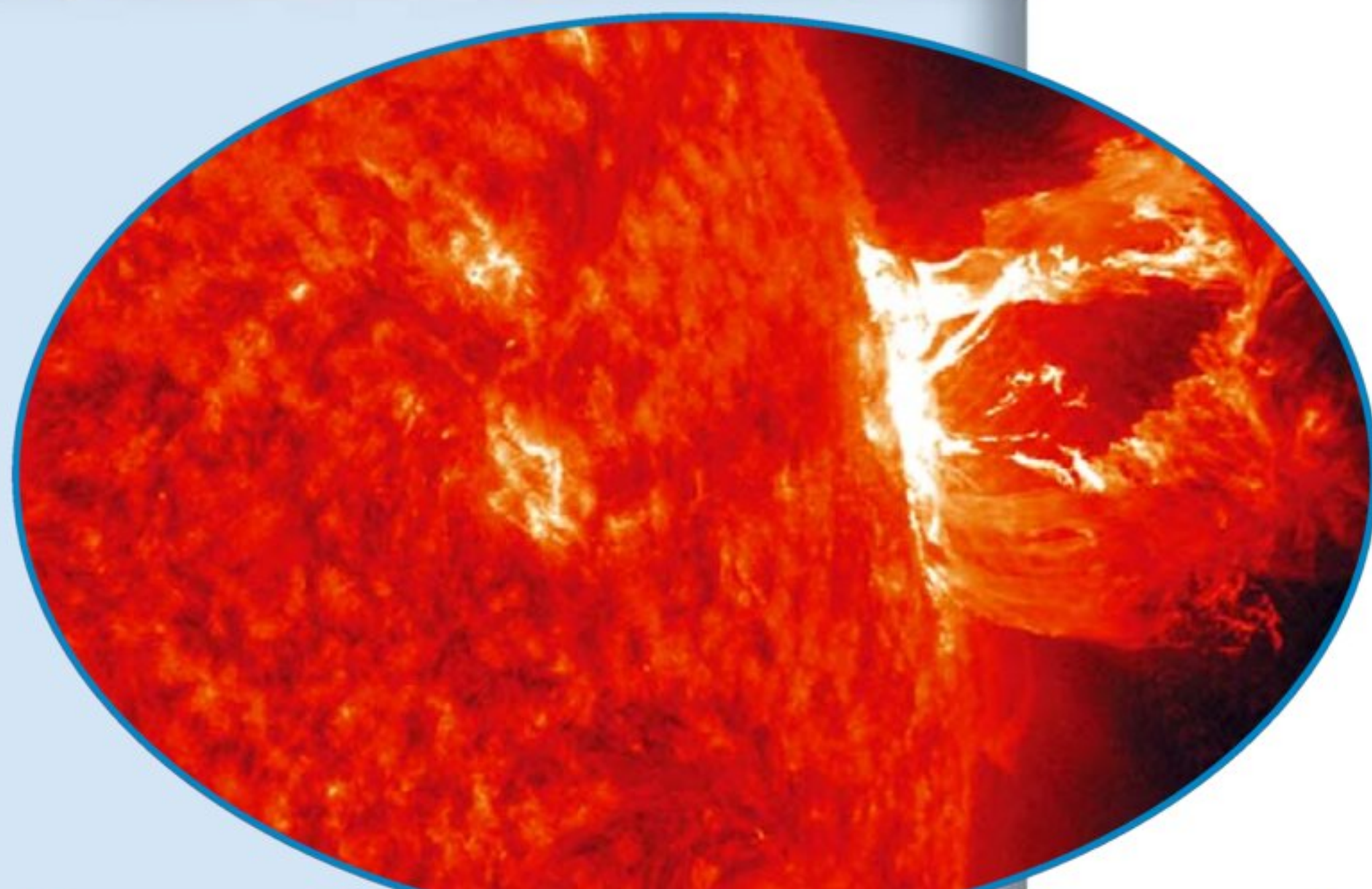
Диаметр Солнца:
 $1,4 \cdot 10^9$ м

Конвективная зона

Зона лучистого переноса

Ядро

Скорость вращения Солнца (на экваторе): 2 км/с
Период вращения: 25 сут.
Скорость на орбите: 2200 км/с



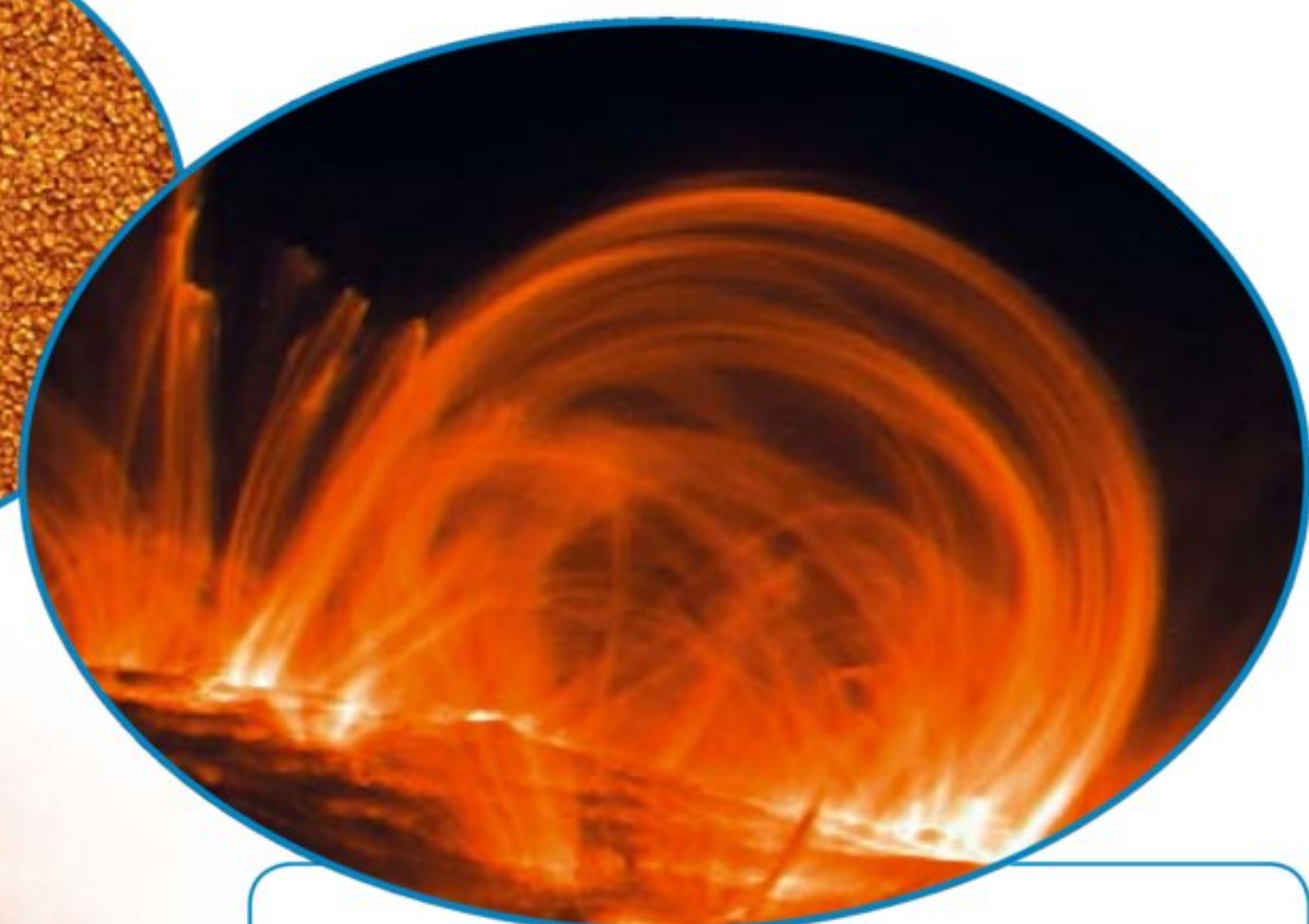
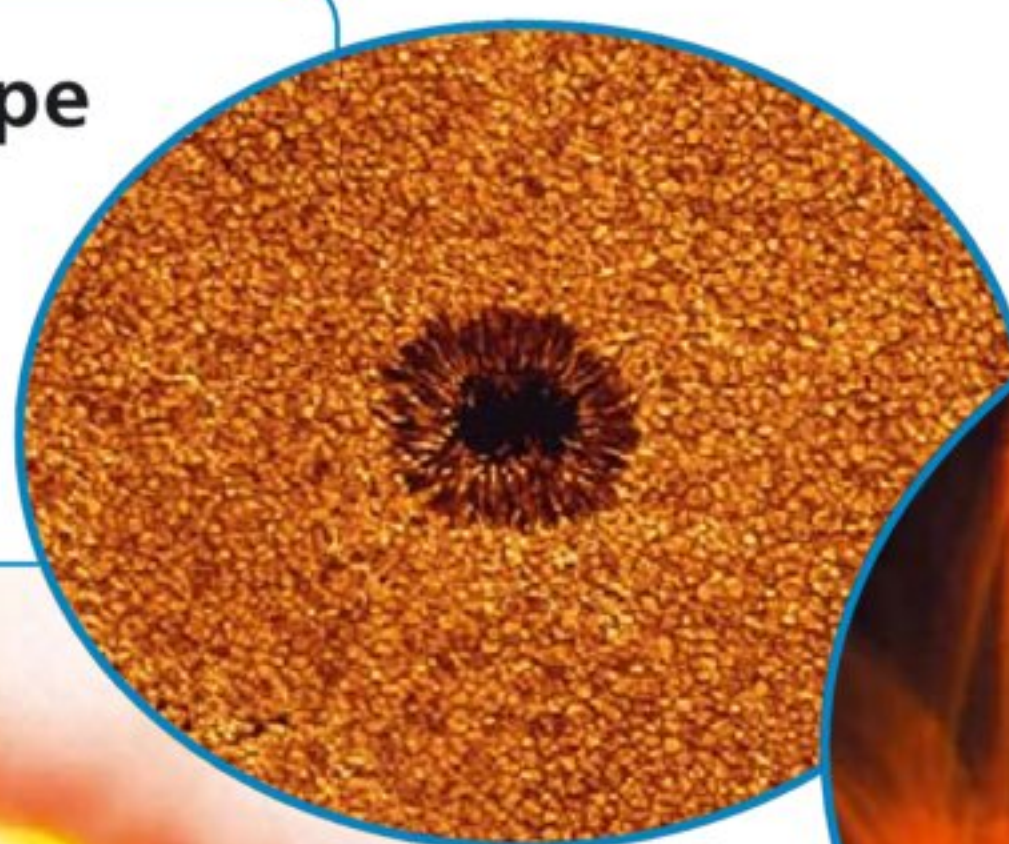
ПРОТУБЕРАНЦЫ — газ, висящий над поверхностью Солнца благодаря магнитному полю.

- Скорость движения вещества: десятки и сотни км/с.
- Температура: до 20 тыс. К.
- Толщина: 5–10 тыс. км.
- Высота: десятки тыс. км.

СОЛНЕЧНАЯ АТМОСФЕРА Выше конвективной зоны находится атмосфера Солнца. Её принято разделять на три слоя. Самый нижний слой — **фотосфера** — видимая поверхность Солнца. Фотосфера имеет толщину около 300–400 км, температура здесь уменьшается до 4–6 тыс. К, а плотность — до 10^{-5} кг/м³, давление около 0,1 атм. При такой температуре оказывается возможным существование нейтральных атомов и молекул. Поверхность фотосферы покрыта так называемыми *гранулами* — ячейками, разделёнными тёмными промежутками. Грануляция является результатом перемешивания всплывающих более горячих потоков газа (кажутся нам светлыми) и опускающихся более холодных (кажутся тёмными). Продолжительность существования каждой гранулы от 1 до 10 мин. Отдельные участки фотосферы с пониженной до 4000 К температурой по сравнению с остальной раскалённой поверхностью воспринимаются как тёмные *солнечные пятна*. Из фотосферы исходит основная часть видимого электромагнитного излучения Солнца.

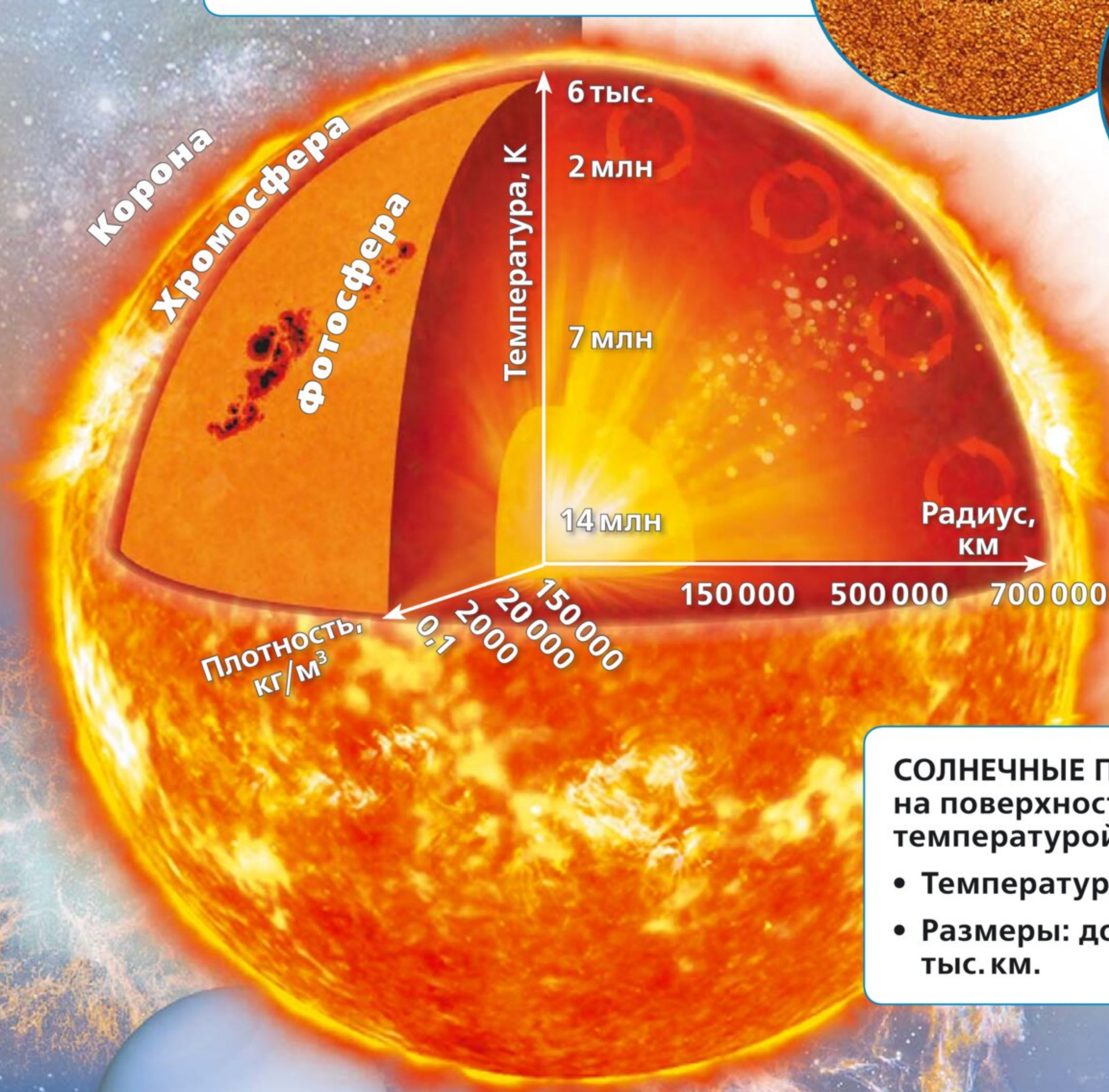
ГРАНУЛЫ — образования в фотосфере Солнца.

- Температура: около 6000 К.
- Размеры: около 1000 км.



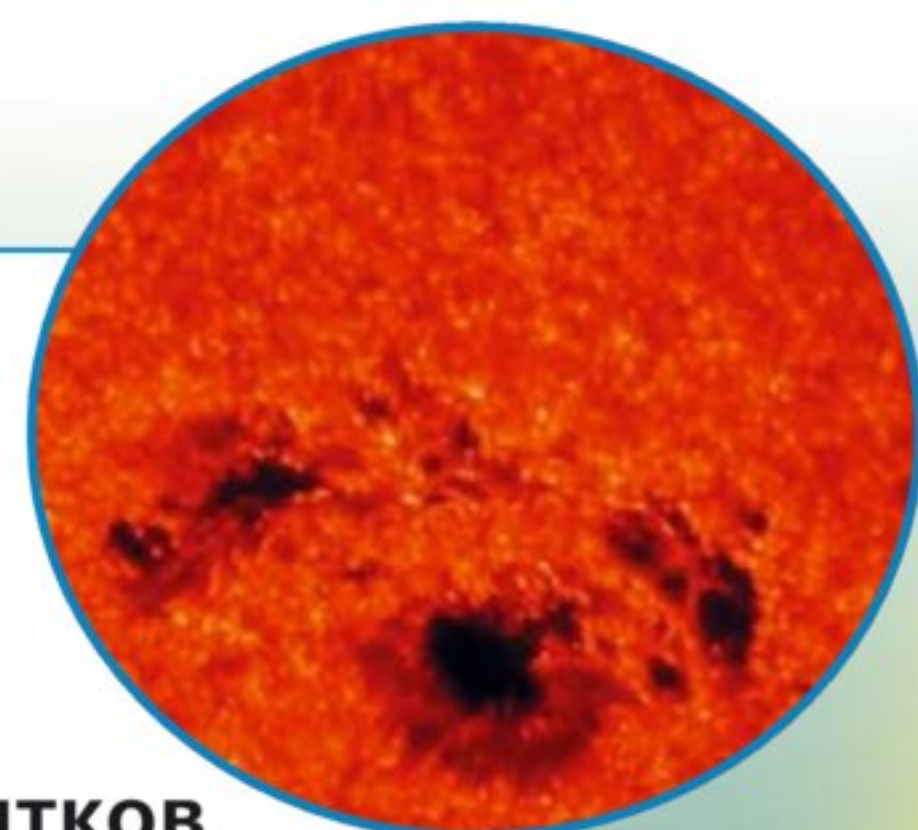
СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ — горячие выбросы энергии в атмосфере Солнца.

- Температура: миллионы кельвинов.
- Размеры: десятки тыс. км.



СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА — области на поверхности с пониженной температурой.

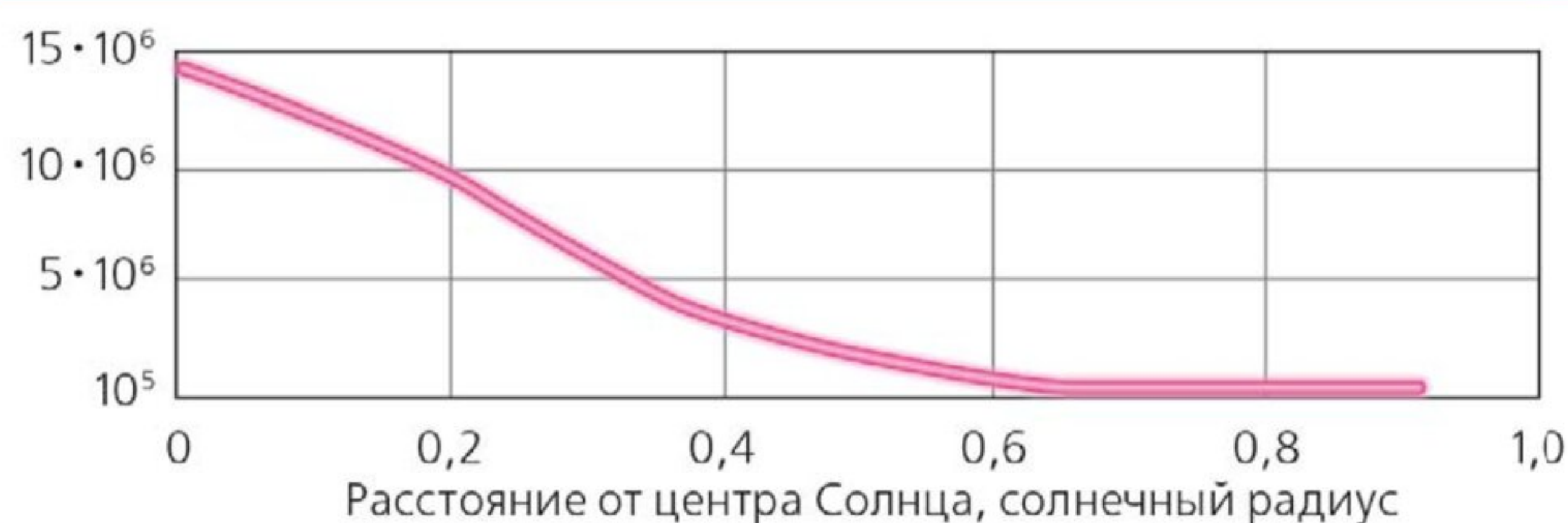
- Температура: около 4500 К.
- Размеры: до нескольких десятков тыс. км.



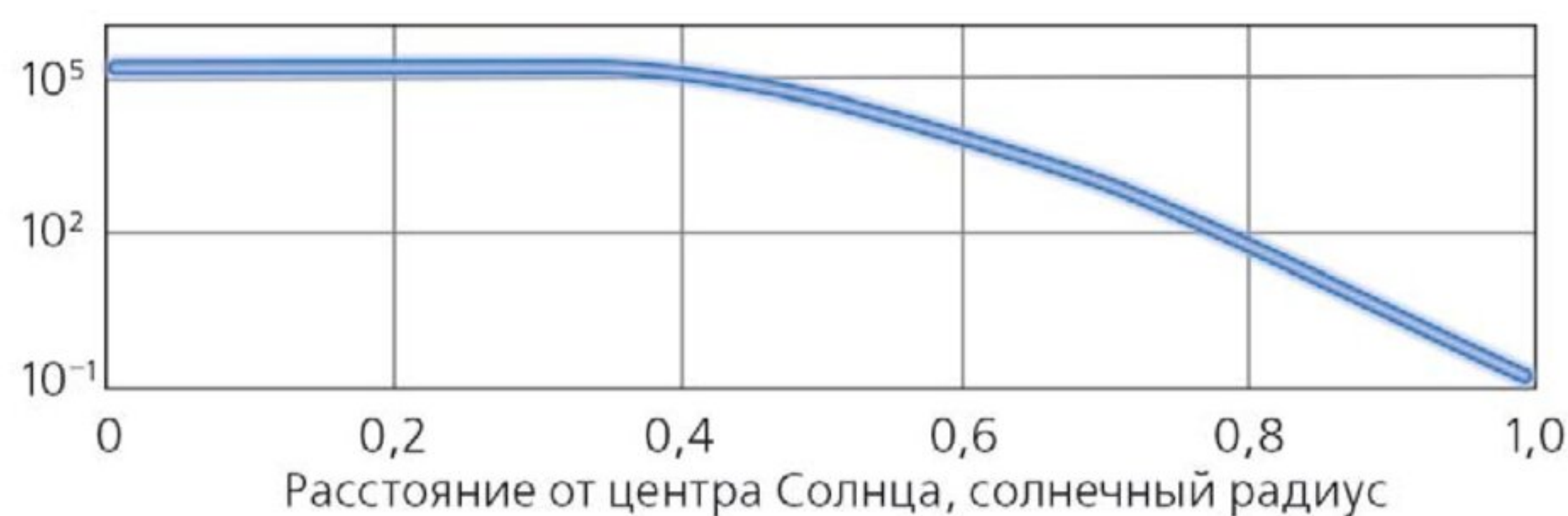
Следующий слой атмосферы — **хромосфера** — может наблюдаться во время полных солнечных затмений. Температура вещества в хромосфере в 2—3 раза выше, чем в фотосфере, а плотность — в сотни раз меньше. Протяжённость хромосферы 10—15 тыс. км. Из хромосферы постоянно происходят горячие выбросы — *спикулы* и *протуберанцы*.

Корона — внешняя, наиболее разреженная часть солнечной атмосферы. В отличие от фотосферы и хромосферы корона простирается на миллионы километров. По мере удаления от Солнца температура вещества короны сначала повышается до 1—2 млн К, а затем постепенно уменьшается. При таких высоких температурах газ превращается в высоко ионизированную плазму, состоящую из положительно заряженных ионов различных химических элементов и свободных электронов. Поток ионизированных частиц, истекающий из солнечной короны со скоростью 400—500 км/с, называют *солнечным ветром*. Солнечный ветер распространяется далеко за пределы орбит Юпитера и Сатурна и образует гигантскую гелиосферу.

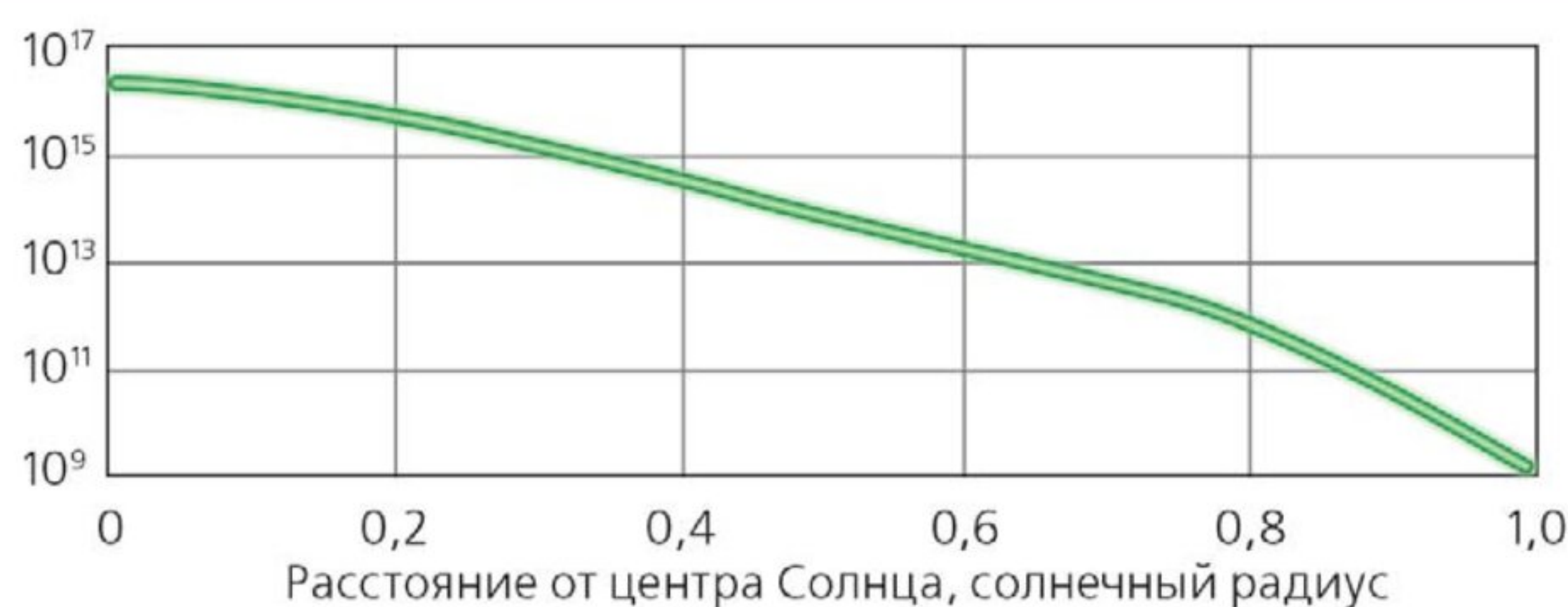
Температура, К



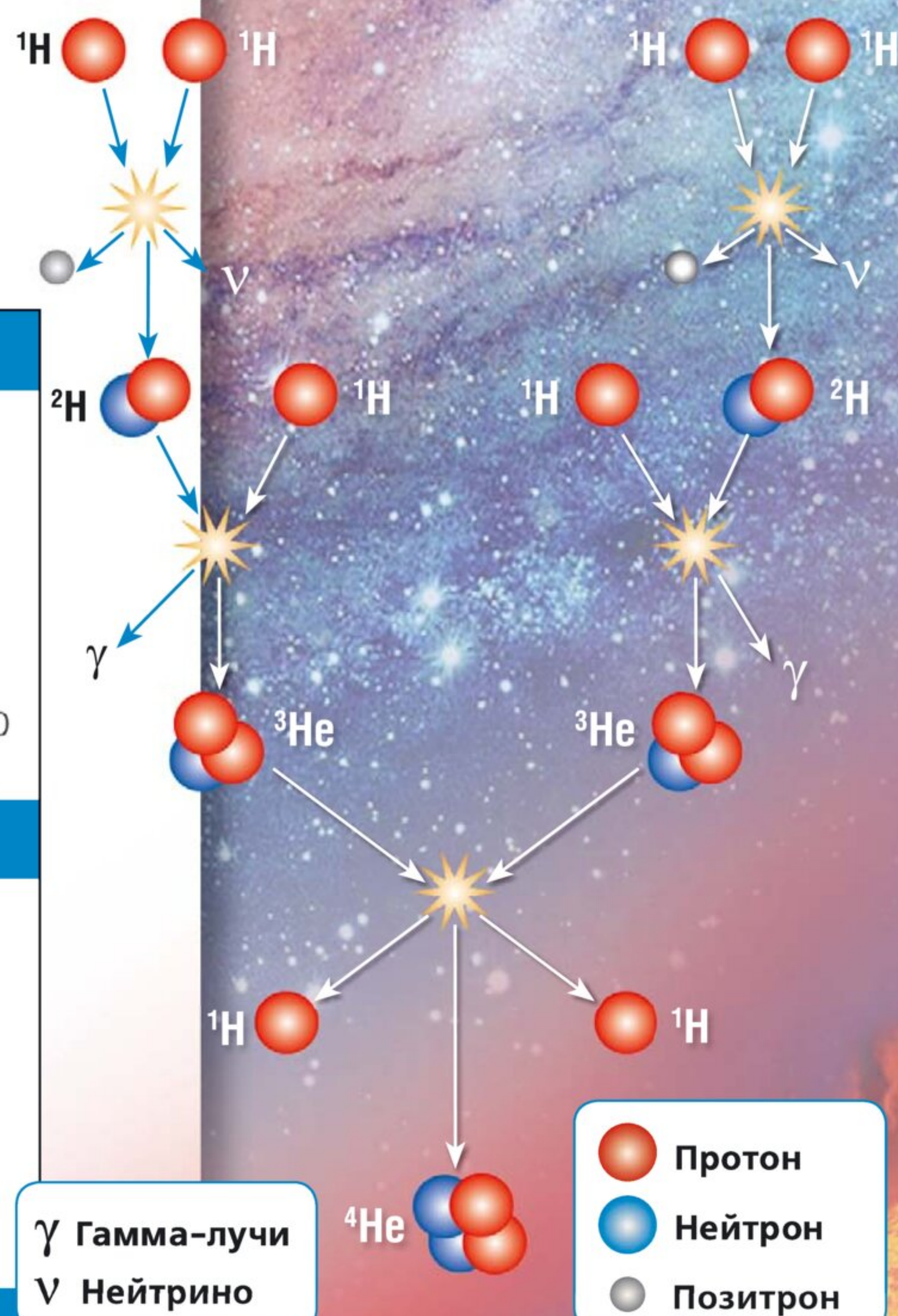
Плотность, кг/м³



Давление, Па



Солнечные пятна, протуберанцы и вспышки — всё это проявление солнечной активности. Солнечную активность связывают с изменениями магнитного поля Солнца. Потоки плазмы, образующиеся во время вспышек, достигают Земли, что становится причиной магнитных бурь, полярных сияний и других геофизических явлений. Солнечная активность изменяется с некоторой периодичностью со средним периодом в 11,2 года.



ВОПРОСЫ:

- Что является источником энергии Солнца?
- Как происходит перенос энергии из центра Солнца к его поверхности?
- В чём проявляется солнечная активность?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Основные характеристики звёзд.
- Классификация звёзд.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое спектр?
- Какие существуют виды спектров?
- Что такое термоядерные реакции?

Важной характеристикой звезды является звёздная величина, которая определяет меру яркости звезды, наблюдаемой с Земли. Звёздная величина зависит от светимости звезды и от расстояния до неё. Чем меньше значение звёздной величины, тем звезда ярче. Невооружённым глазом можно рассмотреть звёзды до 6-й величины. Например, звёзды ковша Большой Медведицы — это звёзды 2-й величины, звёздная величина Веги — 0. У особо ярких светил значение звёздной величины отрицательно: у Сириуса около $-1,5$.

Большая часть материи видимой Вселенной сосредоточена в звёздах. Звёзды все разные. Одни из них мы видим отчётливо, другие едва различимы невооружённым глазом, а некоторые можно увидеть только в телескоп. Благодаря астрономическим исследованиям люди многое узнали о различных характеристиках звёзд и природе их излучения.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗД

Основными характеристиками звезды, определяющими её свойства, являются масса, химический состав и возраст. Зная их, можно рассчитать и остальные параметры, такие как радиус, температура, внутреннее строение, а также *светимость звезды*. Светимость — это полная энергия, излучаемая небесным телом в единицу времени, или другими словами, мощность излучения. Светимость Солнца, как уже было сказано, составляет примерно $4 \cdot 10^{26}$ Вт. Когда учёные научились измерять расстояния до звёзд, стало очевидно, что светимость некоторых из них превосходит светимость Солнца. Например, светимость Сириуса больше светимости Солнца в 22 раза.

Все характеристики звёзд взаимосвязаны. Например, звёзды самой высокой светимости, как правило, обладают большой массой, и наоборот, маломассивные звёзды светят очень слабо. Массы звёзд составляют приблизительно от $1/20$ до 100 масс Солнца. Радиусы звёзд могут быть от 0,1 (у карликов) до 1000 (у гигантов) от солнечного радиуса. Как следствие, светимость может быть как в 10 тыс. раз меньше, так и в 100 тыс. раз больше, чем у Солнца. Основную информацию о звёздах даёт испускаемое ими электромагнитное излучение в различных областях спектра.

Ещё одна характеристика — *цвет звезды*. Наблюдая за звёздами, можно заметить, что их цвет различен. По цвету звёзд астрономы определяют температуру их поверхности. Самые горячие звёзды — голубого и белого цвета, менее горячие — желтоватого, холодные — красноватого цвета. Но даже наиболее холодные звёзды имеют температуру 2—3 тыс. К.

СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЁЗД

Состав и строение звёзд астрономы изучают по их спектру. Сходные между собой спектры объединяют в спектральные классы. Современная гарвардская спектральная классификация звёзд основана на виде и числе спектральных линий в звёздном спектре. Основные классы в ней обозначают латинскими буквами: O — B — A — F — G — K — M. Вид линий в спектре обусловлен в основном температурой звезды, поэтому звёзды, принадлежащие различным классам, отличаются своими температурами. Наше Солнце принадлежит к спектральному классу G.

20 000 K

10 000 K

8000 K

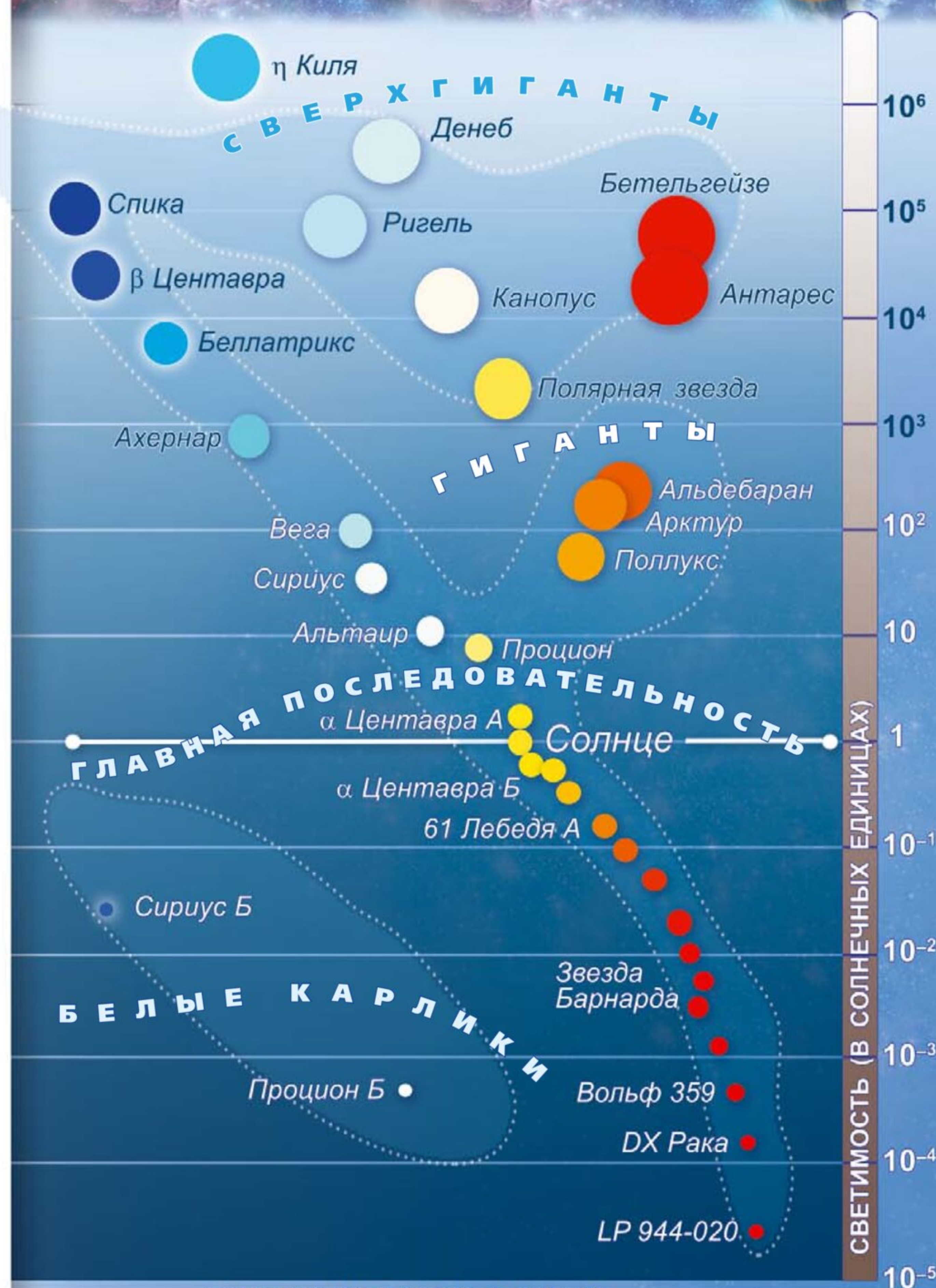
6000 K

4000 K

3000 K

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА—РАССЕЛА

В начале XX в. датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг и американский астроном Генри Рассел независимо друг от друга обнаружили, что цвет звезды (а следовательно, и её температура) связан со светимостью звезды. Эта зависимость отображается на диаграмме, на которой по оси абсцисс откладываются спектральные классы (температура) звезды, а по оси ординат — светимость звезды. На диаграмме все звёзды образуют отдельные группы, называемые последовательностями. Около 90% звёзд, к числу которых относится и Солнце, расположены на *главной последовательности*. Чем больше масса звезды и её светимость, тем выше положение звезды на главной последовательности. В верхней части главной последовательности находятся большие голубые звёзды с массами около 50 солнечных, а в нижней части — малые звёзды, называемые *красными карликами*, с массами около 0,07 солнечных. Звёзды, расположенные правее и выше звёзд главной последовательности, обладают высокой светимостью и относятся к группе *гигантов* и *сверхгигантов*. Высокая светимость этих звёзд объясняется тем, что площадь их поверхности достаточно велика. Диаметр гигантов может превышать диаметр Солнца в 200 раз. В левой нижней части диаграммы расположены горячие звёзды с низкой светимостью — *белые карлики*. Эти звёзды должны быть небольшими по размеру, в среднем в 100 раз меньше Солнца.



Интенсивны линии ионизированного гелия

Линии нейтрального гелия

Линии водорода достигают наибольшей интенсивности

Линии водорода ослабевают. Усиливаются линии ионизированных металлов

Линии водорода очень слабые. Интенсивны линии ионизированного кальция

Линий водорода почти нет. Многочисленные линии металлов

Линии металлов ослабевают. Сильные полосы окиси титана и других молекулярных соединений

ВОПРОСЫ:

- Что такое звёздная величина?
- По каким признакам можно классифицировать звёзды?
- Что собой представляет диаграмма Герцшпрунга—Рассела?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие процессы происходят в звёздах.
- Строение звёзд.
- Как рождаются и умирают звёзды.

ВСПОМНИТЕ:

- Каково строение Солнца?
- Что такое термоядерные реакции?

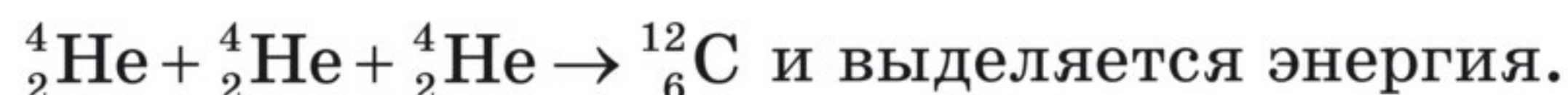
СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

Продолжительность жизни звёзд настолько велика (десятки миллионов и миллиарды лет), что невозможно проследить жизнь хотя бы одной из них от начала до конца. Однако можно наблюдать за звёздами, находящимися на разных стадиях развития.

МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ЗВЁЗД

Внутреннее строение звёзд зависит от их положения на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, которое определяет ход основных термоядерных реакций, происходящих в их недрах. Для звёзд главной последовательности, как и для Солнца, основным источником энергии служат термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Как и Солнце, они имеют ядро, зону лучистого переноса и конвективную зону. Однако у массивных горячих звёзд главной последовательности температура в ядре настолько высока и выделение энергии происходит так быстро, что излучение не может передать всю образующуюся там энергию. Поэтому в недрах массивных звёзд главной последовательности возникают центральные конвективные зоны.

Красные гиганты и сверхгиганты имеют сложную структуру. После того как весь водород звезды превратится в гелий, гелиевая оболочка звезды начинает сжиматься, и звезда становится горячее. Гелий при этом начинает превращаться в углерод:



Ядро горячего гелия окружено тонким слоем горячего водорода, который поступает из внешней оболочки звезды. В дальнейшем в результате ядерных реакций в центре массивной звезды происходит синтез всё более тяжёлых элементов вплоть до железа. Синтез элементов тяжелее железа уже не приводит к выделению энергии. Таким образом, гиганты и сверхгиганты состоят из маленького железного ядра и последовательных горячих оболочек из кремния, неона, кислорода, углерода, гелия и водорода. Далее идёт небольшая зона передачи энергии излучением и протяжённая конвективная зона.

В белых карликах термоядерные реакции не происходят. Светимость белых карликов обеспечивается за счёт самых внешних, сжимающихся, слоёв.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

Звёзды зарождаются из газопылевых облаков, которые называют *туманностями*. Под действием силы гравитации происходит сжатие, или коллапс, туманности — образуется *протозвезда*. Она начинает вращаться, а её центр — нагреваться. Когда температура небесного тела достигает порядка 10^7 К, начинают протекать термоядерные реакции, в ходе которых ядра водорода



сливаются в ядра гелия. В результате термоядерных реакций высвобождается огромное количество энергии и загорается новая звезда. На *главной последовательности* звезда проводит большую часть своей жизни. Говорят, что она находится в основной фазе своей эволюции. Так, звёзды размером с наше Солнце светят около 10 млрд лет, пока не израсходуют на ядерный синтез весь водород. Массивные звёзды сжигают водород более интенсивно (несколько десятков миллионов лет), а маленькие красные карлики — очень медленно (десятки миллиардов лет).

После сжигания водорода звезда покидает главную последовательность. Начинаются термоядерные реакции с участием гелия. При сгорании гелия в ядре звезды выделяется колоссальное количество энергии, что приводит к расширению её внешних слоев. Звезда начинает увеличиваться в объёме, а суммарная энергия излучения остаётся на том же уровне. Поэтому внешние слои звезды остывают и меняют цвет с жёлто-оранжевого на красный, и звезда превращается в *гиганта* или *сверхгиганта* в зависимости от массы. Её диаметр увеличивается примерно в 100 раз.

Далее судьба звезды также зависит от её массы. Для звезды типа Солнца после сжигания гелия реакции ядерного синтеза прекращаются. Ядро звезды начинает опять сжиматься, а внешние оболочки рассеиваются в космическом пространстве. Сжавшееся ядро, остаток от прежней звезды, становится *белым карликом*, который с течением времени остывает до холодного состояния.

Ядро звезды, масса которой во много раз превышает массу нашего Солнца, после полного сгорания ядерного топлива начинает остывать и быстро сжиматься. При этом выделяется огромное количество энергии. В итоге звезда взрывается, и на небе можно наблюдать очень яркую вспышку. Такую звезду называют *сверхновой*. Через некоторое время она исчезает с небосвода.

После сверхновой в зависимости от начальных размеров звезды может остаться лишь небольшое тело — нейтронная звезда размером 10—12 км. Такие звёзды состоят из нейтронов и имеют невероятно высокую плотность (порядка 10^{16} кг/м³). Нейтронные звёзды являются конечной стадией эволюции звёзд с массой намного большей, чем масса нашего Солнца.

В некоторых сверхновых звёздах сила сжатия настолько велика, что материя ядра звезды сжимается до очень плотного состояния. Такие звёзды с массой, значительно превышающей массу Солнца, заканчивают свой жизненный путь, превращаясь в *чёрные дыры*. При этом сила притяжения образовавшегося тела так велика, что оно перестаёт «отпускать» от себя даже собственный свет.

Превращение звезды в чёрную дыру не означает, что её нельзя обнаружить. Чёрную дыру можно обнаружить по гравитационному взаимодействию. Так, чёрные дыры поглощают световые лучи, проходящие вблизи, и отклоняют лучи, проходящие на более далёком расстоянии от них.

Звезда, подвергаясь сильно-му сжатию, через какое-то время перестаёт излучать свет. Радиус, до которого необходимо сжать звезду, чтобы она перестала «отпускать» от себя свет, называют радиусом Шварцшильда в честь немецкого учёного Карла Шварцшильда, который впервые его рассчитал. Например, для Солнца радиус составляет порядка 3 км. Таким образом, если Солнце сжать до радиуса 3 км и менее, то оно превратится в чёрную дыру!

ВОПРОСЫ:

- Чем отличается строение звёзд главной последовательности от строения гигантов и сверхгигантов?
- Как рождаются и умирают звёзды?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Типы галактик.
- Каково строение и размеры Млечного Пути.
- Что такое квазары.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое гравитационные силы?
- Какие существуют виды звёзд?
- Что такое чёрные дыры?

Линзовидные галактики — это промежуточный тип между спиральными и эллиптическими. Они характеризуются наличием диска, но не имеют спиральных рукавов. Этих галактик насчитывают 20% от общего числа галактик.

Вследствие гравитации астрономические тела во Вселенной организуются в системы. В безбрежном космическом пространстве звёзды объединяются в звёздные архипелаги — галактики. На данный момент открыто более миллиарда галактик!

ТИПЫ ГАЛАКТИК

Все галактики, помимо обычных звёзд, включают в себя межзвёздный газ, пыль, нейтронные звёзды, чёрные дыры, а также различные туманности. Количество звёзд и размеры галактик могут быть различными. Они могут содержать от 10^6 до 10^{12} звёзд, а диаметр различаться от 5 до 250 килопарсек (16—800 тыс. световых лет). В 1926 г. американский астроном Эдвин Хаббл предложил классифицировать галактики в зависимости от их формы. Все галактики были разбиты на 3 типа: эллиптические, спиральные и неправильные.

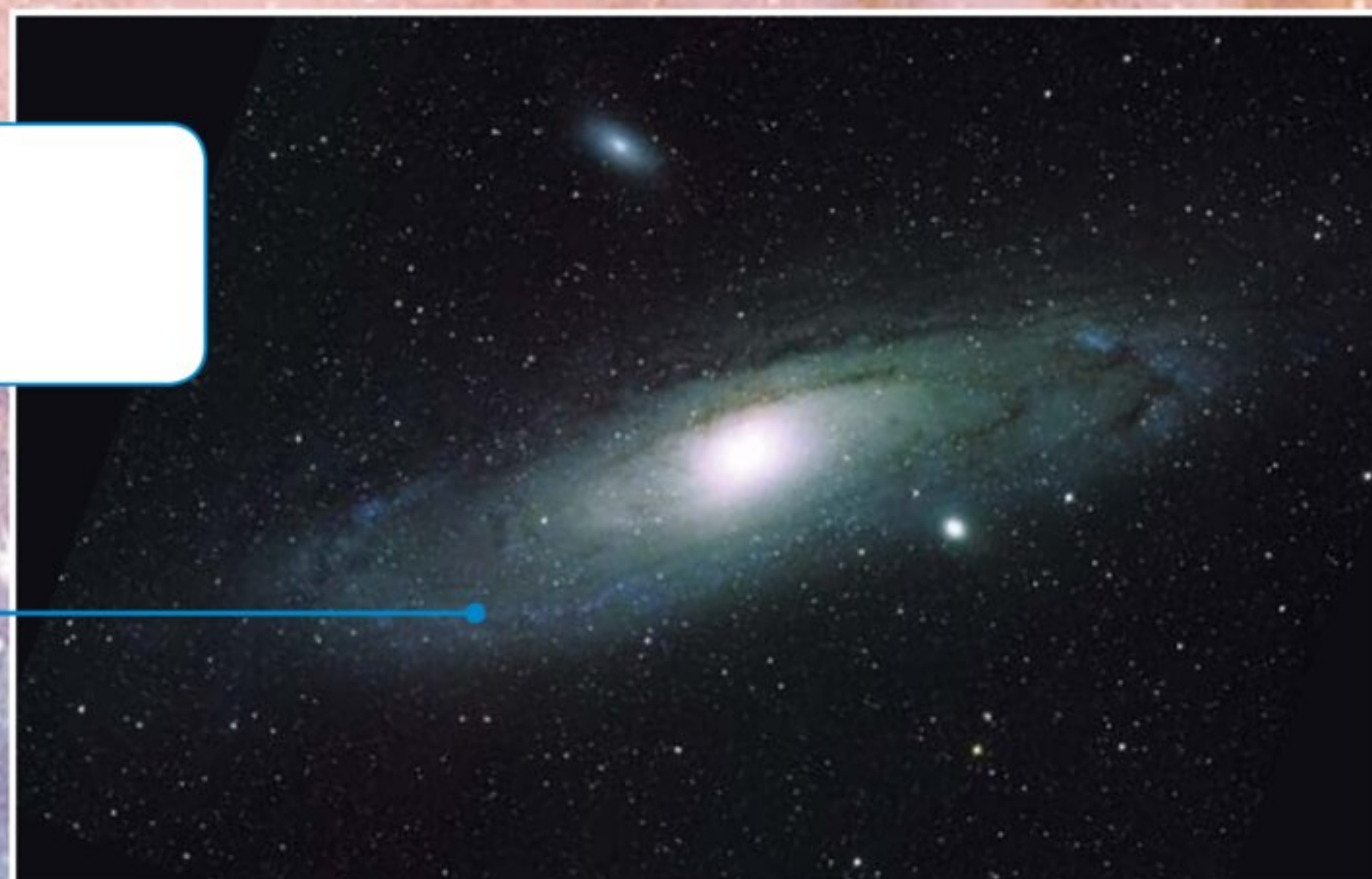
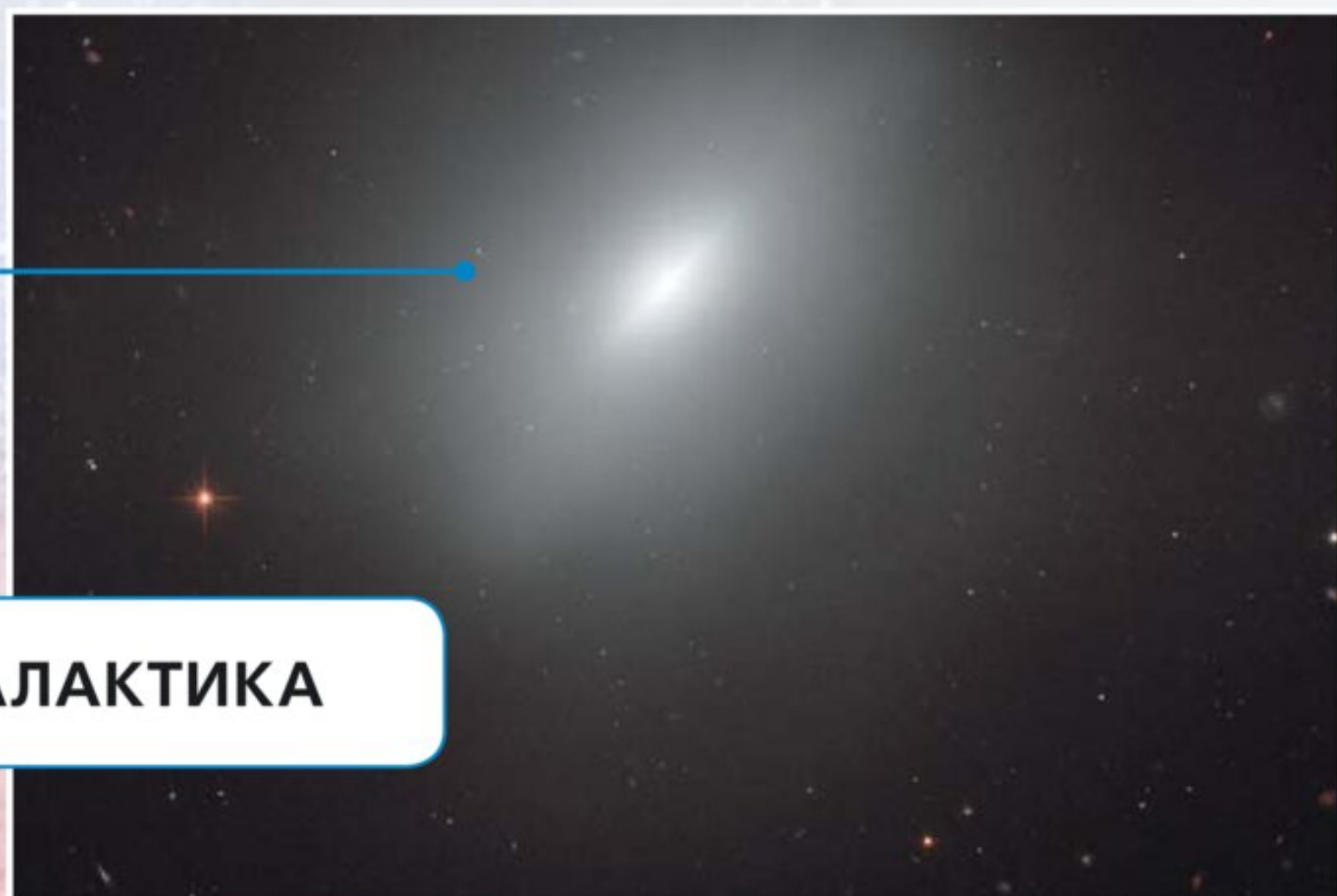
Эллиптические галактики составляют примерно четверть от общего числа известных галактик. Они характеризуются эллиптической формой, а их яркость уменьшается по мере удаления от центра. Они почти не содержат газа и пыли, поэтому в них почти не происходит рождения новых звёзд.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК

ВСЕЛЕННАЯ

ЛИНЗОВИДНАЯ ГАЛАКТИКА

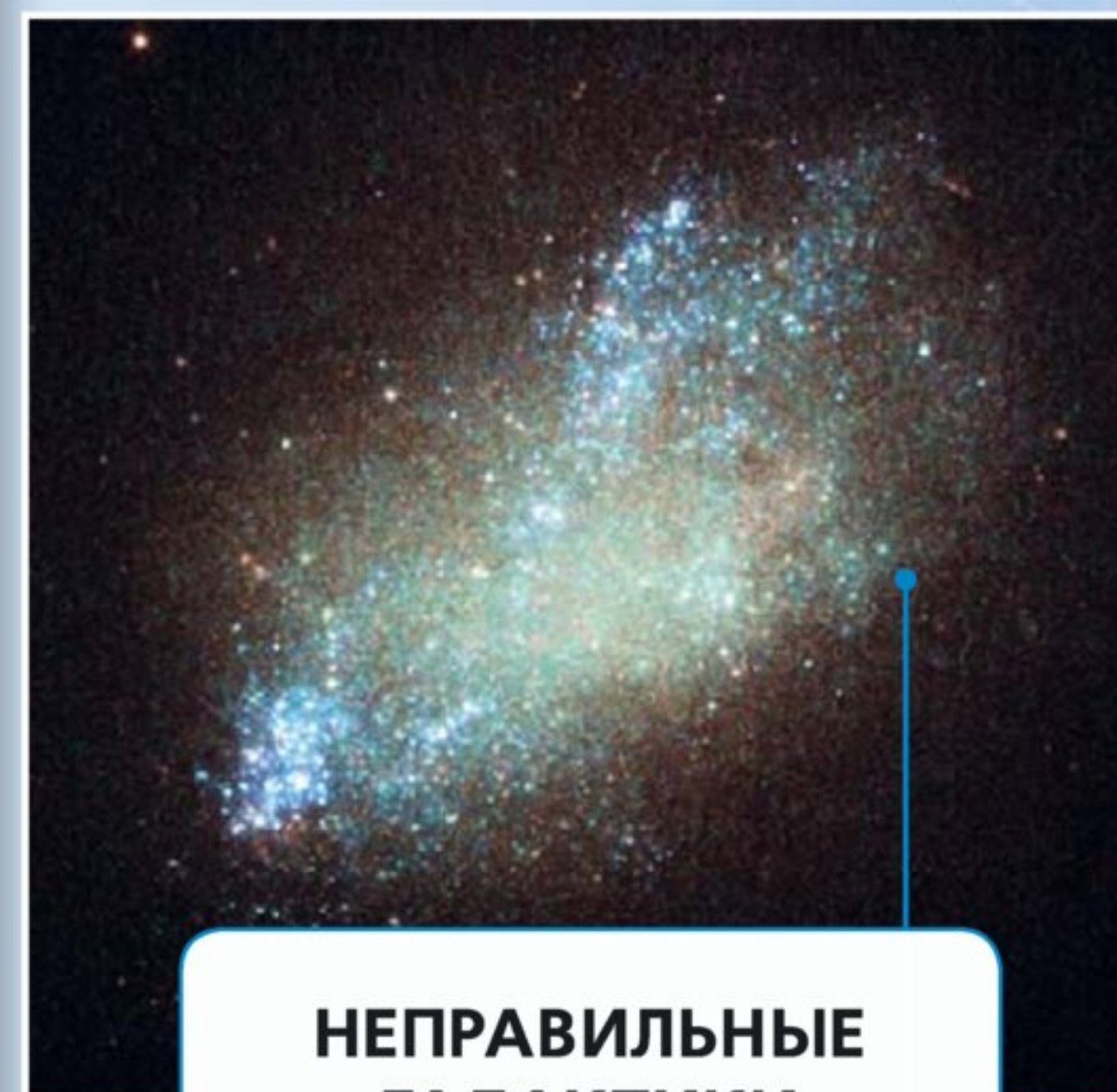
ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ
ГАЛАКТИКА



Спиральные галактики имеют форму диска с очень ярким центром — ядром, от которого отходят спиральные рукава. В центре этих галактик расположены старые звёзды, а в спиральных рукавах — молодые. В рукавах из облаков газа и пыли происходит активное образование новых звёзд. Все спиральные галактики вращаются со значительными скоростями. Некоторые спиральные галактики имеют в центре перемычку — яркую линию из звёзд, выходящую из центра галактики и пересекающую её посередине. В отличие от спиральных галактик, в которых рукава выходят обычно из ядра, в спиральных галактиках с перемычкой рукава начинаются на концах перемычек. К этому типу галактик относят и нашу галактику Млечный Путь. К спиральным галактикам относят половину всех наблюдаемых галактик.

Неправильные галактики имеют форму без явно выраженного ядра и спиральных ветвей. Неправильные галактики содержат много газа и пыли (до 50 % их общей массы). Ранее галактику Магеллановы Облака относили к неправильным галактикам, но позже выяснилось, что она имеет спиральную структуру. К данному типу относят около 5 % от общего числа галактик. Считается, что большинство неправильных галактик в прошлом являлись спиральными или эллиптическими, но деформировались под действием гравитационных сил.

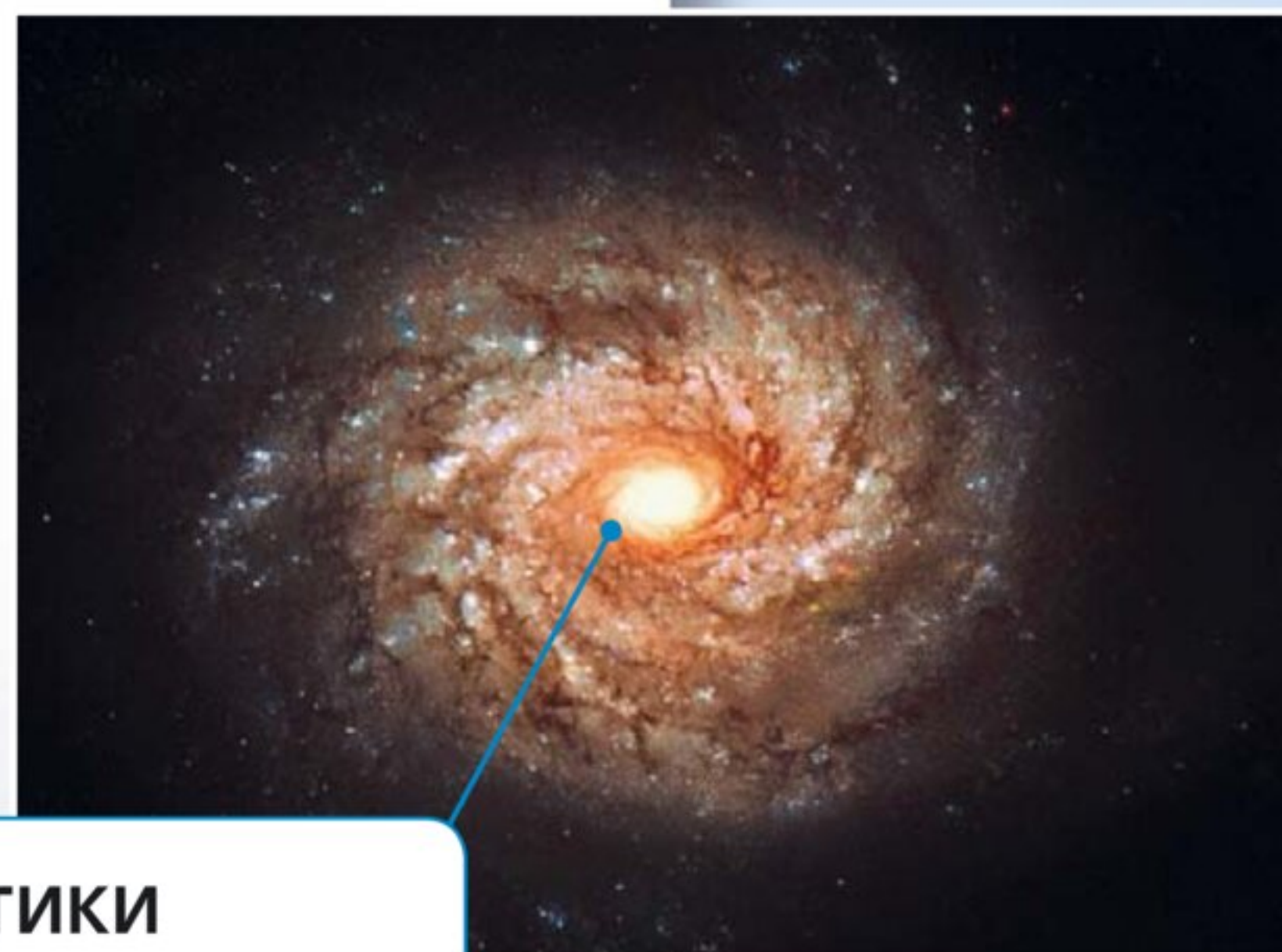
Солнце со своей планетной системой вращается вокруг центра Галактики со скоростью 200—220 км/с и совершает один оборот примерно за 220 млн лет. Это означает, что за всё время своего существования Земля облетела вокруг центра Галактики примерно 20 раз.



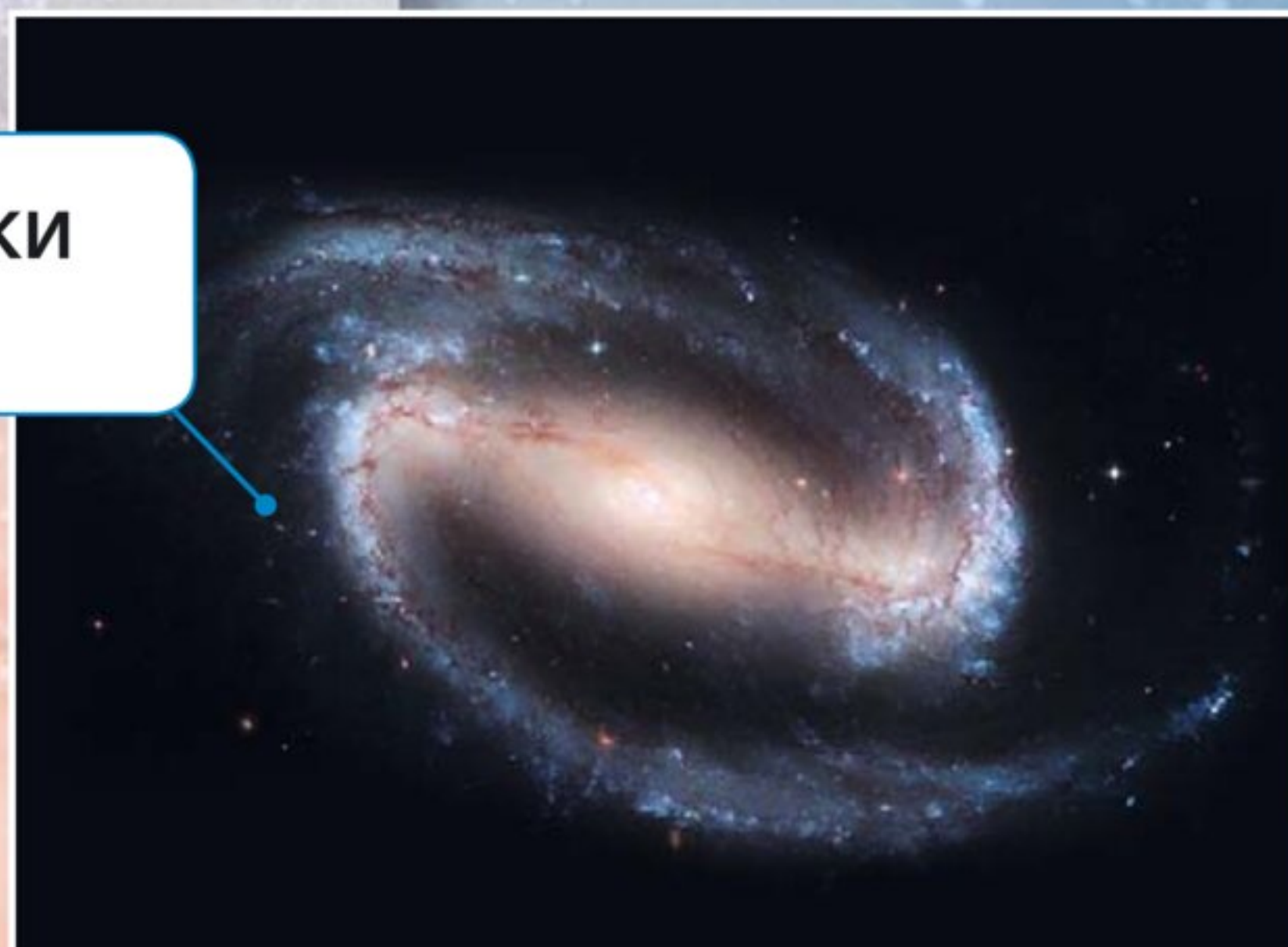
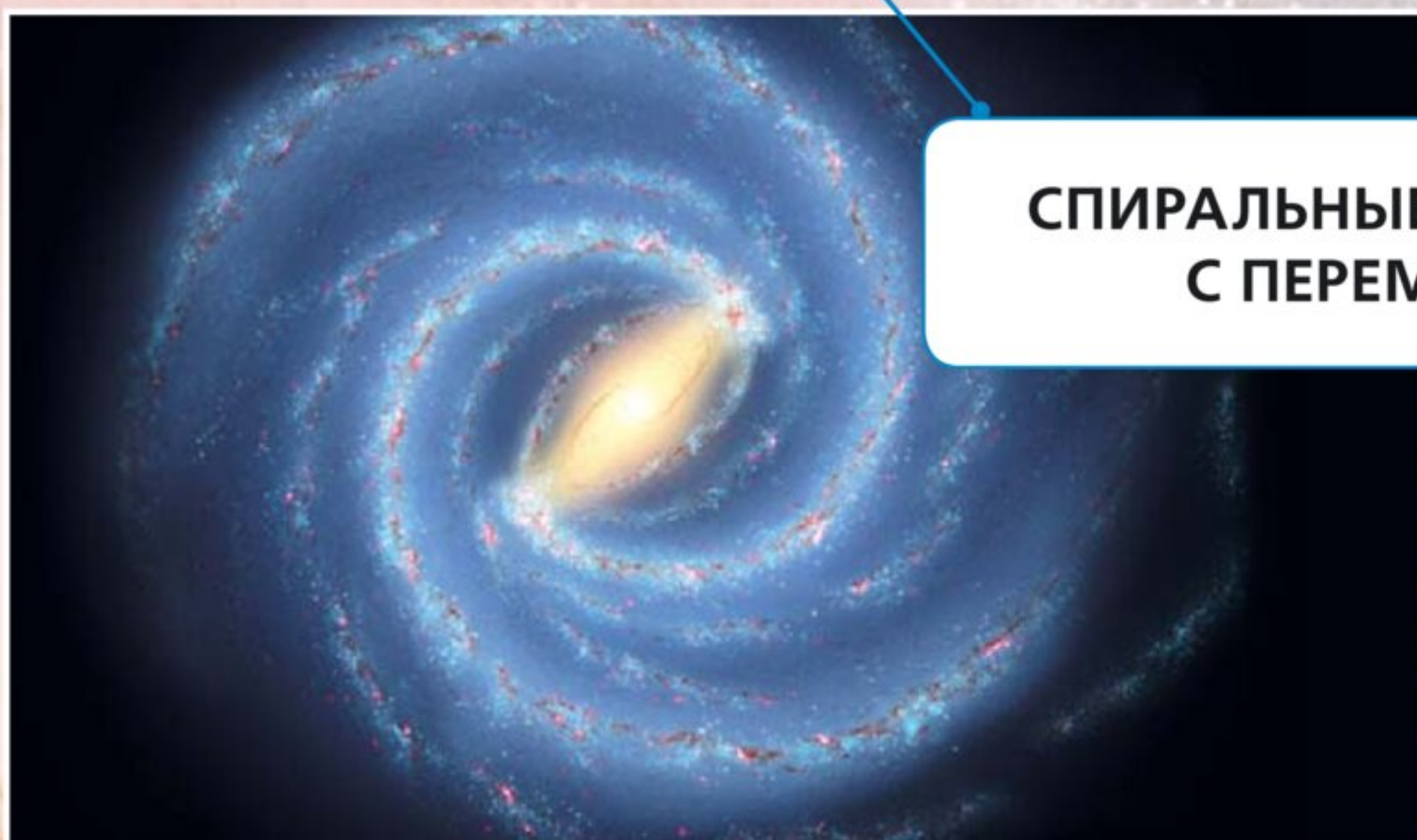
**НЕПРАВИЛЬНЫЕ
ГАЛАКТИКИ**



СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ



**СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ
С ПЕРЕМЫЧКОЙ**



Направление движения

Рукав
Стрельца

Рукав
Лебеда

Рукав Персея

Рукав Ориона

МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ Земля, Солнечная система и все звёзды, видимые невооружённым глазом, находятся в нашей Галактике, известной под названием Млечный Путь.

Млечный Путь состоит примерно из 10^{11} звёзд. Диаметр Галактики составляет примерно 80 000 световых лет, а толщина — 6000 световых лет. Млечный Путь относится к спиральным галактикам с перемычкой. В его центре находится ядро. Заглянуть в глубь ядра невозможно из-за плотных скоплений звёздной пыли, однако этот участок излучает мощные радиоволны и рентгеновские лучи. Астрономы считают, что только сверхмассивная чёрная дыра может излучать такую энергию. Она получила название Стрелец А* (находится в созвездии Стрельца). Под действием сил всемирного тяготения все звёзды вращаются вокруг центра Галактики. При изучении расположения звёзд и направления их движения удалось обнаружить некоторые из спиральных рукавов Галактики.

Солнце расположено между спиральными рукавами Стрельца и Персея. Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23—28 тыс. световых лет. Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики практически совпадает со скоростью вращения спиральных рукавов. Это означает, что Солнечная система не пересекает области спиральных рукавов, где происходит активное звёздообразование, порождающее мощное излучение, губительное для всего живого.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Солнце расположено между спиральными рукавами Стрельца и Персея. Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23—28 тыс. световых лет. Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики практически совпадает со скоростью вращения спиральных рукавов. Это означает, что Солнечная система не пересекает области спиральных рукавов, где происходит активное звёздообразование, порождающее мощное излучение, губительное для всего живого.

Местная Группа галактик включает более 30 галактик



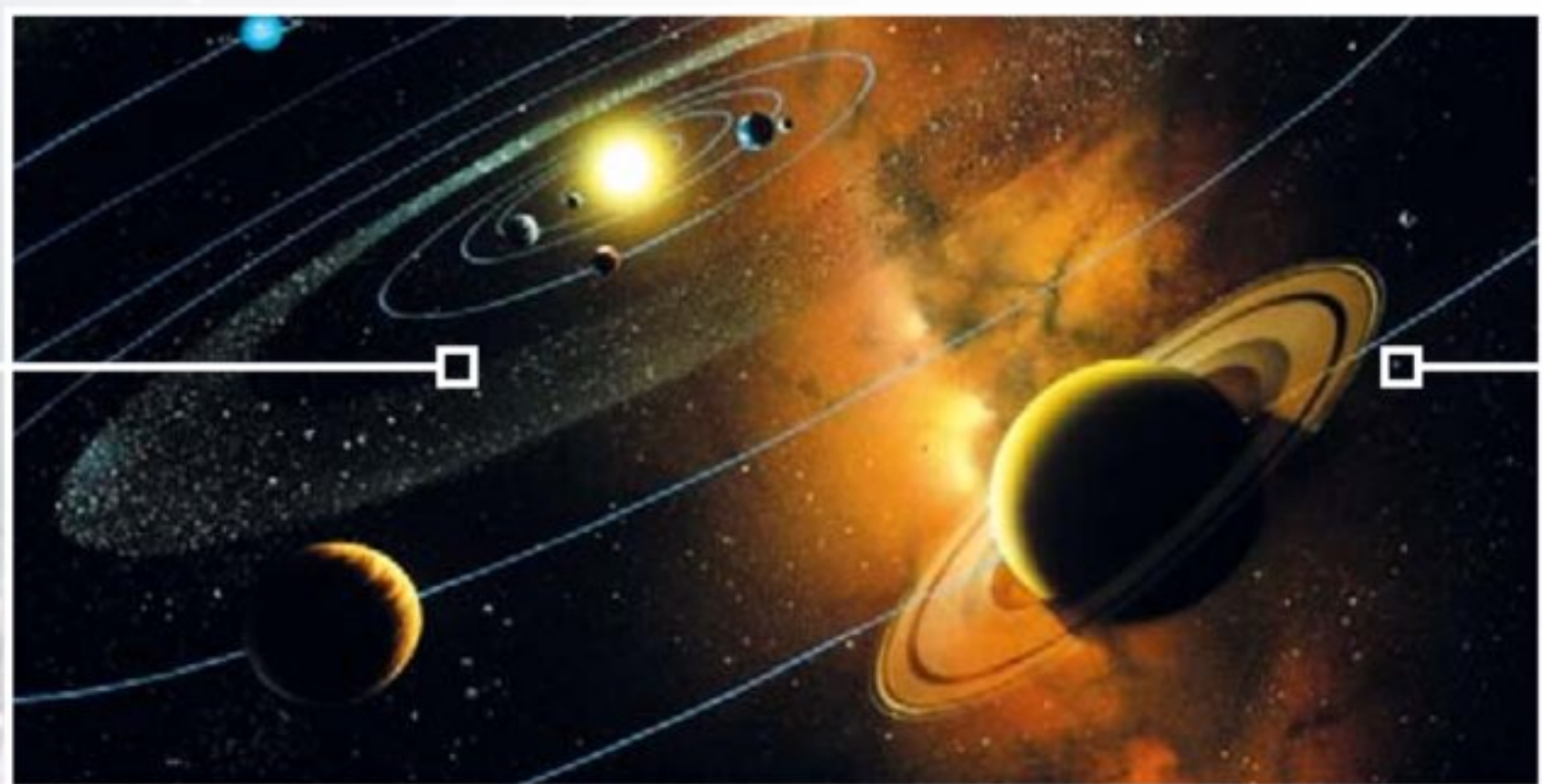
Млечный Путь содержит несколько сотен миллиардов звёзд



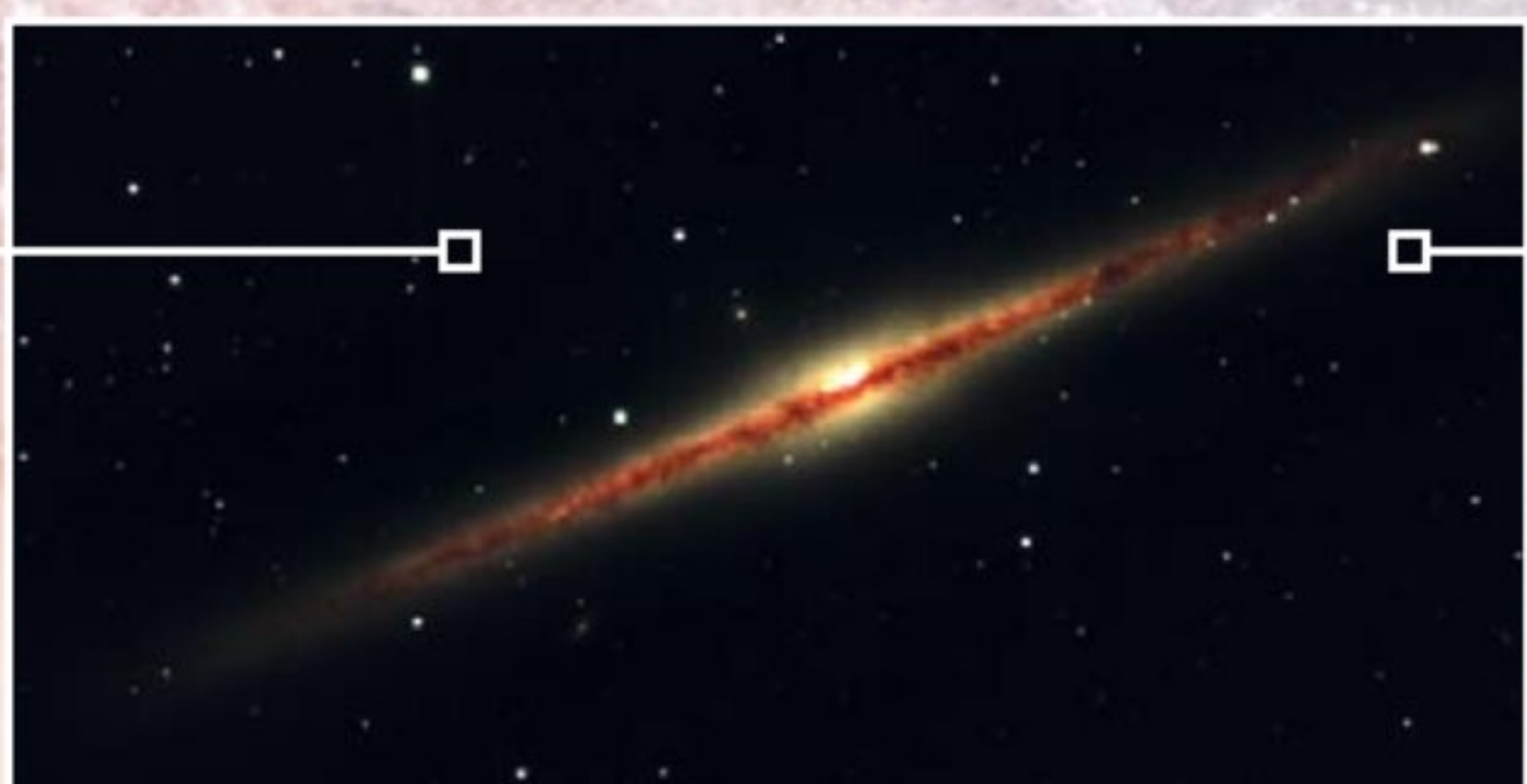
СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК Галактики, притягиваясь друг к другу, объединяются в *скопления галактик*. Так, наша галактика Млечный Путь вместе с примерно 30 другими галактиками образует скопление, которое называется Местной группой. Самые крупные из галактик Местной группы — это Млечный Путь, туманность Андромеды и галактика Треугольника. Галактики Большое и Малое Магеллановы Облака вращаются вокруг Млечного Пути и являются его спутниками.

КВАЗАРЫ (англ. *quasar* — *QUASi stellAR radio source*, т. е. похожий на звезду радиоисточник) — класс астрономических объектов, отдалённых от нас на расстояние более миллиарда световых лет и обладающих высокой светимостью. Квезары были впервые обнаружены в 1960 г., астрономы считали их радиозвёздами. Однако позже выяснилось, что линии в их спектрах сильно смещены в красную сторону, и по красному смещению удалось измерить расстояния до квазаров. Оказалось, что квазары являются самыми удалёнными объектами видимой части Вселенной.

Что представляют собой квазары, ещё до конца не изучено. Согласно одной из гипотез, квазары находятся в ядрах крупных галактик. Как считается, эти ядра — сверхмассивные чёрные дыры, которые затягивают материю из окружающего пространства. Такая чёрная дыра может поглощать даже целые звёзды. В результате должно выделяться огромное количество энергии, которое выбрасывается в виде электромагнитного излучения над и под чёрной дырой.



Солнечная система расположена между спиральными рукавами Стрельца и Персея на расстоянии 23–28 тыс. световых лет от центра Галактики



Млечный Путь. Вид сбоку. Сверхмассивная чёрная дыра Стрелец А* в центре Галактики

Галактики, расположенные в пространстве достаточно близко, взаимодействуют друг с другом посредством гравитационных сил. В результате взаимодействия одинаковых по размеру галактик может измениться их форма. Если одна из галактик крупнее, то она начинает притягивать к себе межзвёздное вещество соседней галактики. Также может произойти и слияние галактик.



Группа галактик



Квезар

ВОПРОСЫ:

- Как классифицируют галактики в зависимости от их формы?
- Что собой представляет Млечный Путь?
- Каково место Солнца в Галактике?
- Что такое квазары?

РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Закон Хаббла.
- Каков возраст и размеры Вселенной.
- Как теория Большого взрыва объясняет происхождение Вселенной.
- Каким может оказаться будущее Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:

- Как образуются звёзды?
- Как устроена Вселенная?
- Что такое космологическое красное смещение?

Самым большим объектом нашего мира является Вселенная. Вселенная — это всё, что существует: от атомов и молекул до огромных космических объектов и их систем.

ЗАКОН ХАББЛА Во Вселенной всё находится в непрерывном движении: планеты вращаются вокруг своих звёзд, звёзды вращаются вокруг центра своих галактик. Кроме того, галактики движутся ещё и в пространстве.

В начале XX в. американский учёный Эдвин Хаббл, анализируя красное смещение далёких галактик, установил, что они удаляются от нашей планеты. Причём, чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется. Это явление разбегания видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения подчиняется закону, который получил название закона Хаббла.



Тяжёлые элементы —
0,03%



Нейтрино —
0,3%



Звёзды —
0,5%



Водород и гелий —
4%



Тёмная материя —
25%



Тёмная энергия —
70%



Закон Хаббла гласит: Вселенная расширяется, причём скорость, с которой галактики удаляются друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними.

Математически закон записывается в виде следующей формулы:

$$v = HR,$$

где v — скорость удаления галактик; R — расстояние между ними; $H \approx 68 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Хаббла.

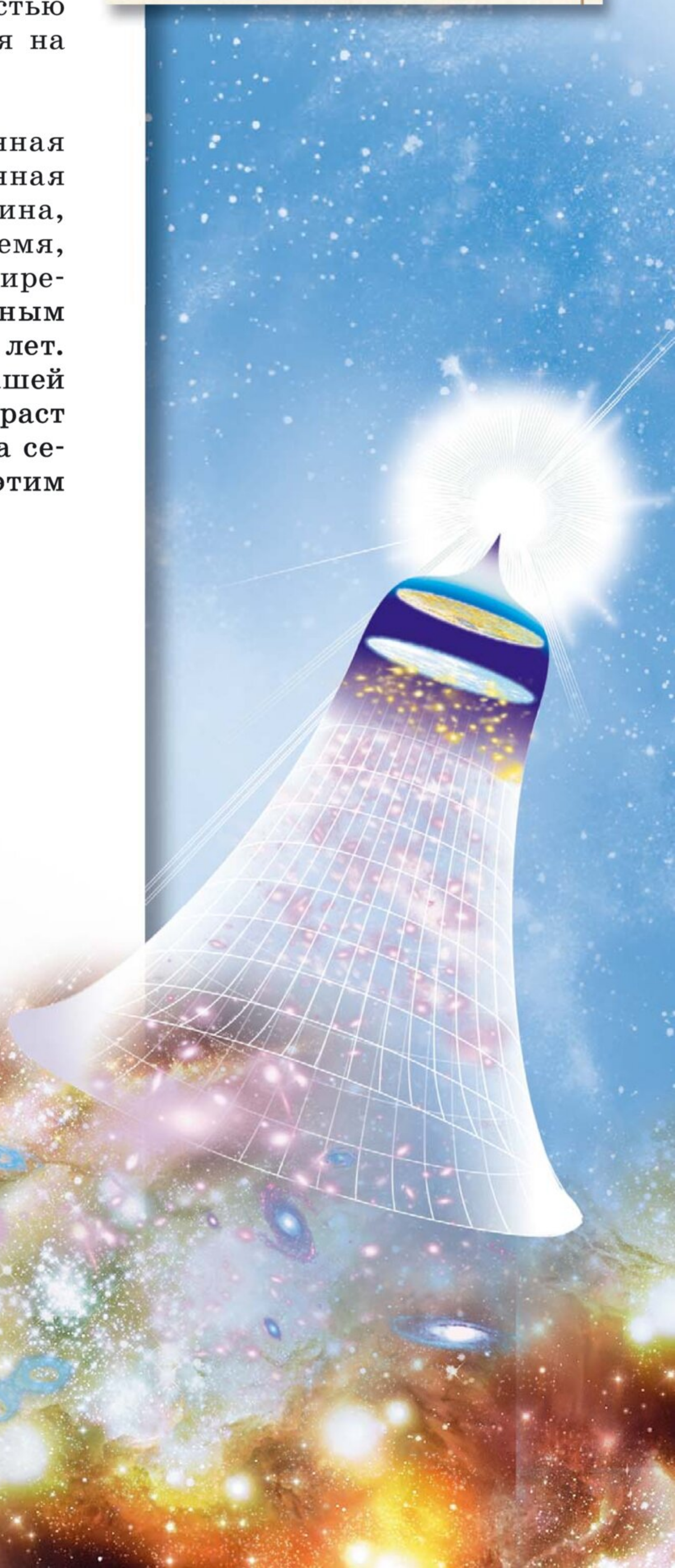
Постоянная Хаббла показывает, с какой скоростью удаляются друг от друга галактики, находящиеся на расстоянии 1 Мпк.

ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ Учитывая, что наша Вселенная расширяется, учёные предположили, что Вселенная расширялась с момента своего рождения. Величина, обратная постоянной Хаббла, характеризует время, прошедшее с момента рождения или начала расширения, т.е. возраст Вселенной. Согласно современным оценкам возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет. Если это утверждение принять за истину, то в нашей Вселенной не должно быть ни одного объекта, возраст которого превышает 14 млрд лет. Все известные на сегодняшний день научные данные согласуются с этим утверждением.

Тёмная материя не испускает электромагнитного излучения и потому недоступна для наблюдения. Её можно обнаружить только по её массе, т.е. гравитационному влиянию на другие объекты, в том числе и свет.

Тёмная энергия влияет на скорость расширения Вселенной.

Учёные пришли к выводу, что расширяется само вещество Вселенной так, что разбегание галактик можно наблюдать из любой точки Вселенной. В этом смысле центра, как такового, у нашей Вселенной не существует. Естественно, и Земля не является центром Вселенной.



РАЗМЕРЫ ВСЕЛЕННОЙ Зная возраст Вселенной, можно оценить её размеры. Согласно теории относительности ни одно тело не может иметь скорость больше, чем скорость света. Поэтому информацию о самом удалённом от Земли объекте Вселенной на Земле получают спустя время, необходимое для того, чтобы свет от него дошёл до Земли.

Таким образом, можно посчитать расстояние до самого удалённого наблюдаемого объекта:

$$s = ct = 13,8 \text{ млрд св. лет},$$

где c — скорость света, t — возраст Вселенной.

Получается, что наблюдаемая Вселенная представляет собой область пространства размером 13,8 млрд св. лет. Этот размер часто называют *радиусом Вселенной*. Однако наблюдаемая область Вселенной много меньше радиуса всей Вселенной и является лишь её небольшой частью.

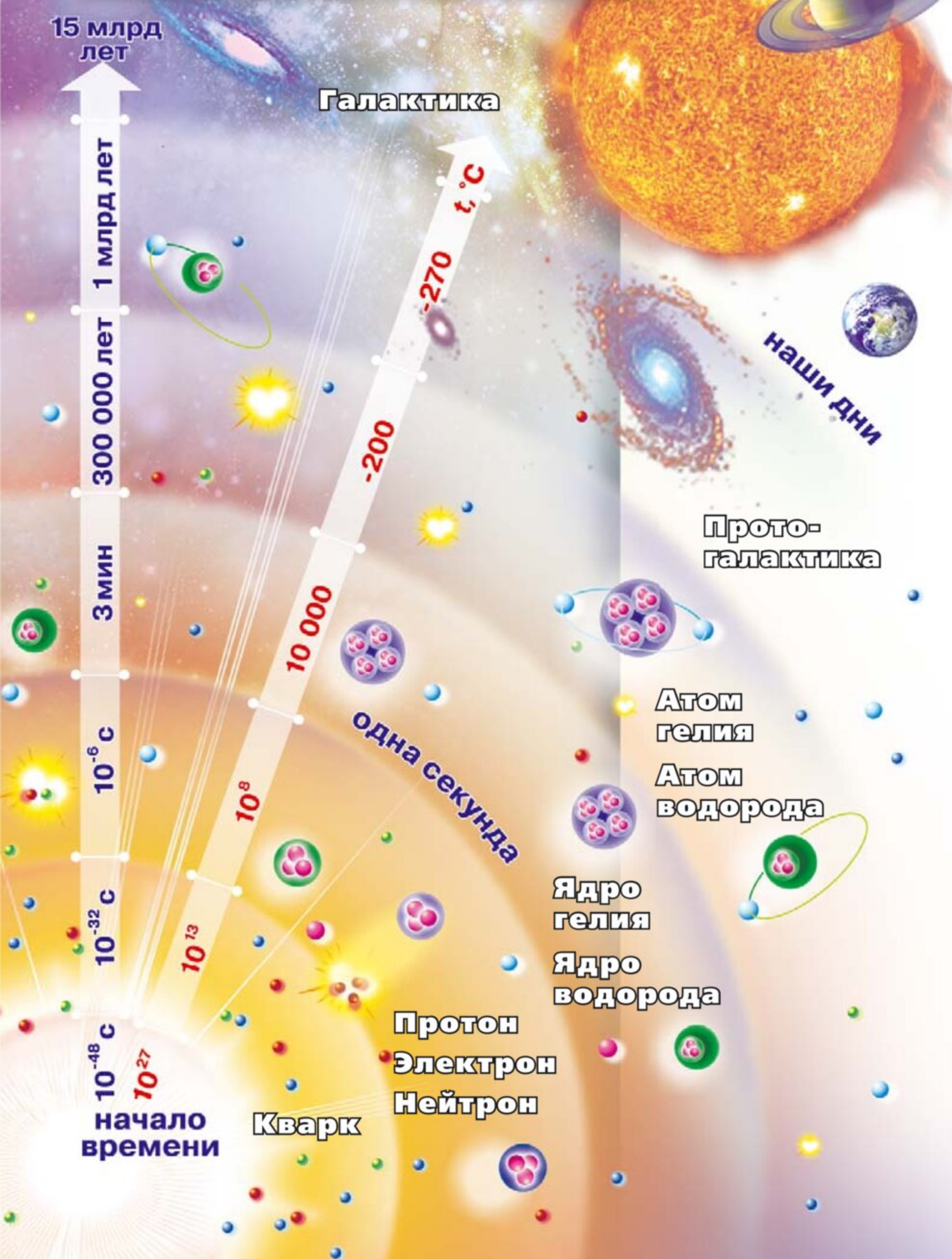
ТЕОРИЯ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА На основе различных наблюдений учёные пришли к выводу, что наша Вселенная родилась в результате Большого взрыва, в момент которого возникла не только материя, но также пространство и время, как таковые. С тех пор наша Вселенная расширяется и постепенно остывает. Эту теорию происхождения Вселенной называют *теорией Большого взрыва*.

Согласно данной теории вещество на начальном этапе имело чрезвычайно высокую температуру и плотность. Учёные предполагают, что в самые первые мгновения после Большого взрыва Вселенная представляла собой первичный «бульон», состоявший из кварков, глюонов, электронов, фотонов и нейтрино. Одновременно с этим начался процесс расширения Вселенной и соответственно понижения температуры первичного вещества.

Через секунду после Большого взрыва температура составляла около 10 000 млн градусов, что примерно в тысячу раз выше температуры в центре Солнца. В это время Вселенная в основном состояла из фотонов, электронов и некоторого количества протонов и нейтронов, которые образовались в результате объединения кварков и глюонов. Примерно через 3 мин после Большого взрыва температура Вселенной понизилась до миллиарда градусов, что соответствует температуре внутри самых горячих звёзд. При такой температуре протоны и нейтроны начали объединяться друг с другом с образованием лёгких ядер — ядер гелия.

Примерно через 300 000 лет Вселенная остыла до 10 000 °C, что позволило про-

Теорию Большого взрыва или, как она первоначально называлась, модель горячей Вселенной, предложил российский и американский физик Г. Гамов.



тонам и ядрам гелия объединиться с электронами с образованием атомов водорода и гелия. Затем, спустя примерно 1 млрд лет, когда температура снизилась примерно до -200°C , под действием сил гравитации из газа атомов водорода и гелия стали формироваться первые звёзды и галактики. Затем галактики стали объединяться в обособленные скопления. Первые звёзды умирали и обогащали космос тяжёлыми элементами, которые служили основой для формирования новых звёзд и планет.

БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ Учёных, которые занимаются изучением Вселенной, называют космологами. Их интересует не только прошлое, но и будущее нашей Вселенной. Согласно современным представлениям судьба Вселенной зависит от средней плотности её вещества.

Если средняя плотность Вселенной больше критического значения (10^{-32} кг/м^3), то через некоторое время силы тяготения остановят её расширение, и начнётся сжатие Вселенной.



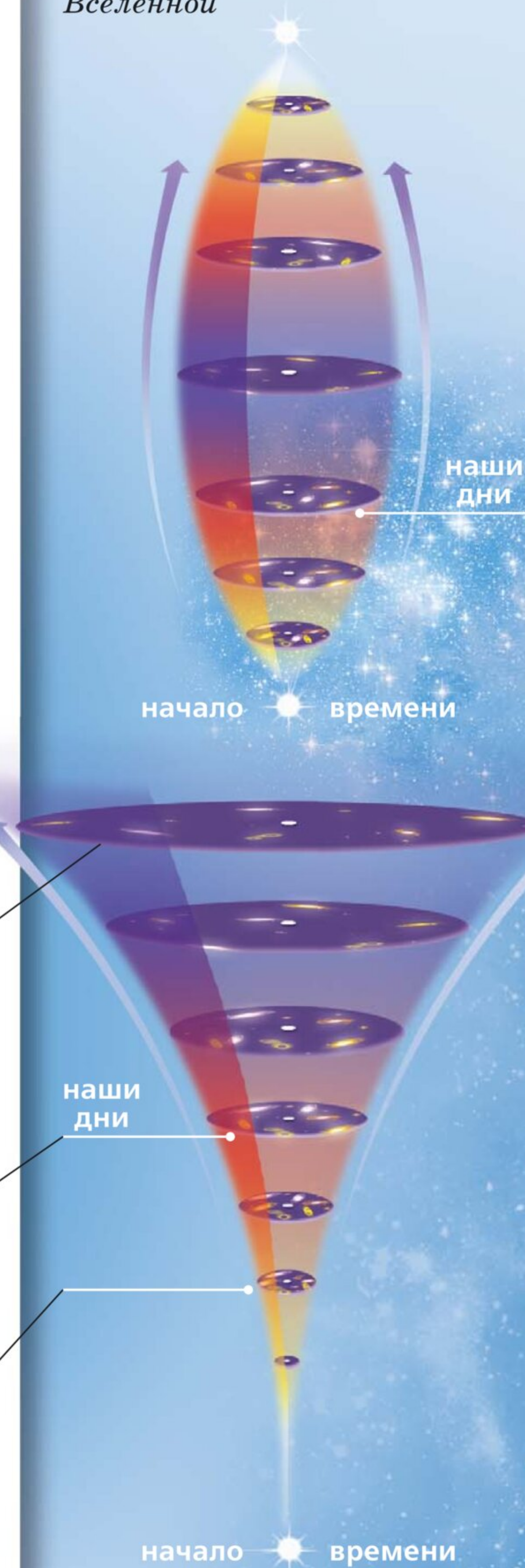
Учёные считают, что до сих пор не обнаружено свыше 90% материи, из которой состоит Вселенная. Эту неизвестную материю, которую мы не можем пока увидеть даже с помощью самых современных приборов и установок, учёные называют *тёмной материей* и *тёмной энергией*. Когда мы поймем природу этой материи, то сможем ответить на многие вопросы происхождения Вселенной, которые до сих пор остаются открытыми.

Вселенная будет сжиматься, пока опять не сожмётся в одну точку. В итоге произойдёт новый Большой взрыв, который приведёт к рождению новой Вселенной, не обязательно по своей структуре похожей на нашу.

Если же средняя плотность Вселенной меньше критического значения, то сил тяготения будет недостаточно, чтобы остановить расширение. В этом случае Вселенная будет всё время расширяться и остывать, в результате все звёзды погаснут, а Вселенная станет холодной и тёмной.

Плотность видимого вещества во Вселенной составляет около $3 \cdot 10^{-34}\text{ кг/м}^3$, т.е. меньше критической. Однако при этих расчётах не учитывается плотность, связанная с тёмной материей. По предварительным оценкам она может быть в 30 раз больше плотности видимого вещества и тем самым играть определяющую роль в дальнейшем сценарии эволюции Вселенной.

Модели возможной эволюции Вселенной



ВОПРОСЫ:

- Как зародилась наша Вселенная согласно теории Большого взрыва?
- Каковы возможные варианты будущего Вселенной?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие области науки занимаются исследованиями Вселенной.
- Современные космические телескопы.
- Экспедиции в Солнечной системе.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое спектр электромагнитного излучения?
- Как устроена Вселенная?

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Исследовать Вселенную можно различными способами: изучая метеориты, упавшие на Землю; наблюдая за объектами, находящимися за пределами нашей планеты, с помощью телескопов; изучая космическое пространство с помощью ракет, спутников, космических станций и кораблей. Кроме того, при помощи экспериментальных физических установок можно изучать материю на уровне атомов, атомных ядер и ещё глубже.

ОБЛАСТИ НАУКИ, ЗАНИМАЮЩИЕСЯ ИССЛЕДОВАНИЯМИ ВСЕЛЕННОЙ

Для того чтобы лучше понять законы Вселенной, в которой мы живём, необходимо изучать окружающий нас мир как в масштабах галактик, звёзд, планет и т. п., так и на уровне атомов, протонов, нейтронов и т. д. Науку, изучающую движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем, называют **астрономией**. В современной физике проблемами микромира занимается такая наука, как **физика микромира**. В XX в. появилась новая область науки, называемая **астрофизикой**. Она изучает небесные тела, их системы и пространство между ними на основе исследования происходящих во Вселенной физических процессов и явлений. Астрофизики изучают не только небесные объекты самых разных размеров (от космических пылинок до Вселенной в целом), но и различные свойства самого космического пространства.

ИЗУЧЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

Метеориты являются важным материалом для изучения Вселенной. Исследуя их состав и структуру, можно судить о веществе самой Вселенной. Оказалось, что в составе метеоритов не найдено ни одного химического элемента, не известного на Земле. Подобные исследования позволяют лучше изучить внутреннее строение Земли и других планет Солнечной системы, а также понять прошлое и будущее нашей Солнечной системы.

КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Космические объекты очень сложно наблюдать с Земли, так как земная атмосфера поглощает часть электромагнитного излучения, идущего из космоса, и отражает другую его часть обратно в космос. Так, например, большая часть инфракрасного и ультрафиолетового излучений, а также рентгеновские и гамма-лучи космического происхождения недоступны для наблюдений с поверхности Земли. Для того чтобы изучать этот спектр электромагнитных волн, существующих в космическом пространстве, необходимо проводить астрономические наблюдения за пределами атмосферы нашей планеты.

Самым известным космическим телескопом является космический телескоп «Хаббл» (*Hubble*), работающий в оптическом диапазоне и названный в честь американ-

Космический телескоп «Хаббл»

Ещё одним телескопом, работающим в оптическом диапазоне, является телескоп «Кеплер» (*Kepler*), названный в честь немецкого астронома И. Кеплера.

Телескоп был запущен НАСА в 2009 г. Его целью является поиск экзопланет (планет, не принадлежащих Солнечной системе) и исследование планетных систем, принадлежащих другим звёздам, отличным от Солнца. За время работы «Кеплер» обнаружил более 1000 планет, некоторые из них похожи на Землю.

ского астронома Эдвина Хаббла. Телескоп был запущен в 1990 г. в рамках совместной программы НАСА (Национальное управление США по авиации и исследованию космического пространства) и Европейского космического агентства. Из-за отсутствия влияния земной атмосферы разрешающая способность у такого телескопа в 7—10 раз больше, чем у подобных телескопов, расположенных на Земле.



За всё время работы с помощью космического телескопа «Хаббл» получено более миллиона высококачественных изображений 22 тыс. небесных объектов: галактик, туманностей, звёзд, планет, включая экзопланеты (планеты, не принадлежащие Солнечной системе). По результатам наблюдений квазаров был уточнён возраст Вселенной — 13,8 млрд лет, а также вычислено ускорение, с которым расширяется Вселенная.

Благодаря космическому телескопу были расширены представления о строении и эволюции Вселенной, пересмотрены старые теории и построены новые, более точно объясняющие различные астрономические явления.

Наши глаза способны воспринимать лишь небольшую часть электромагнитного спектра, поэтому большая часть Вселенной остаётся невидимой для оптических приборов. Между тем наблюдения в инфракрасных лучах позволяют нам обнаруживать так называемые тёплые объекты, включая планетарные системы и межзвёздную пыль. Благодаря инфракрасным космическим телескопам учёным удаётся обнаруживать скрытые звёздные объекты и изучать такие процессы, как рождение звёзд и целых галактик.

Рентгеновские лучи доносят до нас массу информации о процессах, происходящих во Вселенной. Поэтому в наше время существуют космические рентгеновские обсерватории для поиска и регистрации различных рентгеновских источников в космосе. Сейчас с помощью рентгеновских обсерваторий учёные изучают звёзды и галактики. Так, нам стало известно многое о рождении, эволюции и смерти звёзд. А изучение далёких галактик показало, что их рентгеновское излучение связано с чёрными дырами, расположенными в центрах этих галактик.



Одной из программ НАСА является программа «Большие обсерватории», которая включает в себя запуск четырёх научно-исследовательских телескопов: «Хаббл» (1990) — для наблюдения в видимом диапазоне, «Спитцер» (2003) — для наблюдения в инфракрасном диапазоне, «Чандра» (1999) — для наблюдения в рентгеновском диапазоне и «Комптон» (2001) — для наблюдения гамма-лучей. Изображения, полученные этими телескопами, доступны не только учёным, но и всем, кто интересуется астрономией.

Космический телескоп «Планк» (2009—2013) был создан для изучения реликтового излучения. На основе результатов исследований был уточнён состав вещества Вселенной. По последним данным Вселенная состоит на 4,9% из обычного вещества, на 26,8% из тёмной материи и на 68,3% из тёмной энергии.



Космический телескоп «Спитцер»

Благодаря инфракрасному телескопу «Спитцер» были получены изображения центров галактик.



Космический телескоп «Чандра»

С помощью рентгеновского телескопа «Чандра» было открыто излучение сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики.

Гамма-телескоп «Ферми» был запущен в 2008 г. За время работы телескоп зарегистрировал множество гамма-вспышек от различных объектов Вселенной. На основе полученных данных учёные ведут поиски тёмной материи.

Космическое гамма-излучение возникает вследствие процессов, происходящих внутри атомных ядер, а также в процессе аннигиляции, т. е. взаимодействия частиц и античастиц (например, электронов и позитронов). Гамма-кванты излучаются сверхновыми, нейтронными звёздами и чёрными дырами. Специальные приборы могут регистрировать гамма-лучи, исходящие от Солнца во время солнечных вспышек.

Мы рассмотрели лишь некоторые космические телескопы и обсерватории, выведенные за пределы нашей планеты. Причём для получения изображения того или иного космического объекта учёные предпочитают комбинировать изображения, полученные посредством нескольких телескопов, с целью получения наиболее полного представления об изучаемом объекте.



Перед вами изображения галактики М101, построенное на основе снимков, полученных с помощью рентгеновской обсерватории «Чандра», телескопа «Хаббл» и инфракрасного телескопа «Спитцер».

КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ

Космические экспедиции очень важны для исследования и освоения Вселенной. В 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли, а в 1961 г. на орбиту вокруг Земли был выведен первый в мире космический корабль-спутник «Восток» с человеком на борту — Юрием Гагариным. С тех пор было отправлено множество спутников и беспилотных космических аппаратов ко всем планетам Солнечной системы, а также их спутникам, астероидам и кометам.

Естественно, что первым объектом для исследования стала Луна как ближайшее к Земле небесное тело. В 1960—1980 гг. было проведено множество успешных миссий СССР и США. В 1959 г. в результате полёта «Луна-3» были получены первые фотографии обратной стороны Луны, не видимой с Земли. В 1969 г. в рамках миссии «Аполлон-11» был совершён первый пилотируемый полёт на Луну. Астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин высадились на поверхность Луны и собрали первые образцы лунной породы для исследований. После этого экспедиции к Луне совершили Япония, Европейское космическое агентство, Китай и Индия. Благодаря этим исследованиям были составлены подробные карты лунной поверхности и выполнен анализ лунных пород.

После успешных экспедиций к Луне были отправлены космические миссии к Венере и к Марсу. Марс является самой изучаемой планетой Солнечной системы, так как многие учёные предполагают, что на Марсе когда-то была жизнь. В рамках первых программ «Марс» (СССР) и «Маринер» (США) были запущены космические аппараты к Марсу, которые сделали снимки поверхности, исследовали состав атмосферы и измерили температуру на поверх-

ПЛАНЕТА	КОЛИЧЕСТВО МИССИЙ
	2
	41
	46
	9
	5
	1
	1



ности. В настоящее время на орбитах Марса работают 5 искусственных спутников, а на поверхности находятся 2 марсохода: «Оппортьюнити» (с 2003 г.) и «Кьюриосити» (с 2012 г.), которые должны получить подробный состав марсианских почв и установить, существовали ли когда-либо условия, подходящие для жизни, а также провести подготовку для высадки человека на Марс. Результаты исследований свидетельствуют, что в древние времена на Марсе была пресная вода, пригодная для жизни.

Миссии к планетам-гигантам начались только через 10 лет после начала изучения планет земной группы. К ним были запущены аппараты НАСА (программы «Пионер», «Вояджер» и др.). Космический аппарат «Галлилео» (1989) первым вышел на орбиту Юпитера, подробно изучил его атмосферу и спутники. Космическая станция «Кассини-Гюйгенс» в настоящее время изучает не только Сатурн, но и его крупнейший спутник Титан.

Человек пока побывал только на Луне, но учёные планируют отправить людей на Марс, Венеру, астероиды и даже за пределы Солнечной системы.

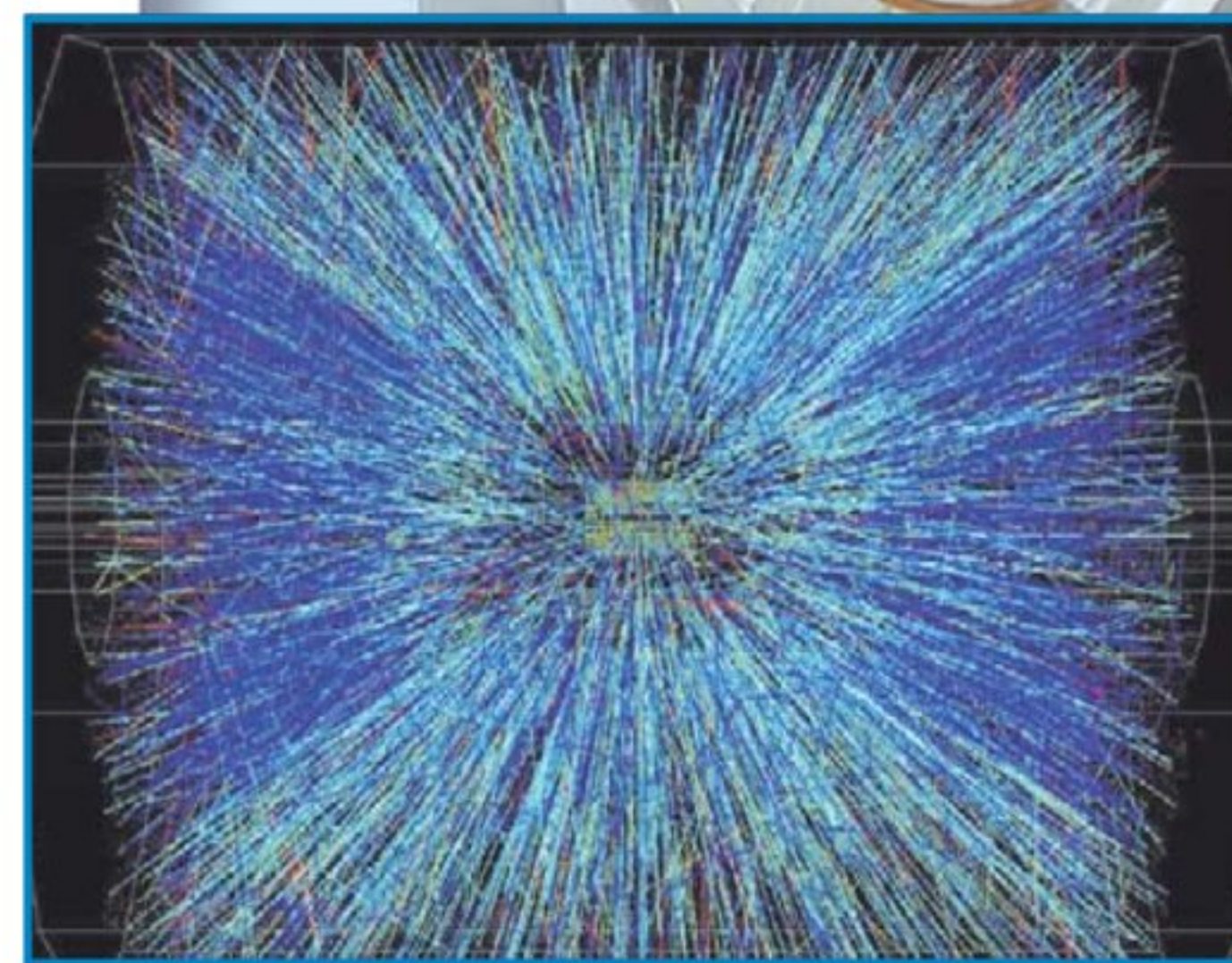
Космический аппарат «Вояджер-2», запущенный НАСА в 1977 г., пройдя мимо Сатурна, приблизился к Урану (1986) и добрался до Нептуна (1989), передав изображения планет и их спутников на Землю. В настоящее время он приближается к границам Солнечной системы и всё ещё поддерживает связь с Землёй.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА МИКРОМИРА Одной из основных задач современной физики микромира является получение ответов на вопросы о том, что происходило в первые мгновения развития Вселенной, что является теми фундаментальными «кирпичиками материи», из которых состоит окружающий нас мир.

Для того чтобы изучать структуру материи на расстояниях, существенно меньших размеров протона, получать в лабораторных условиях температуру и плотность вещества, сравнимые с теми, которые были на ранних стадиях развития Вселенной, создаются гигантские физические установки, называемые коллайдерами.

В коллайдерах сталкивают частицы и ядра, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, и обладающие огромными энергиями. В результате таких столкновений учёные надеются смоделировать условия, которые существовали в первые мгновения зарождения нашей Вселенной. Подобные установки требуют огромных интеллектуальных и материальных затрат, которые невозможны в рамках одного, даже самого богатого государства. Именно поэтому различные государства мира объединяют свои усилия и создают международные организации и сообщества, под эгидой которых учёные и инженеры разных стран совместно решают ряд сложных задач.

Крупнейшими мировыми научными центрами являются Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН), расположенный недалеко от швейцарского города Женева, Брукхейвенская национальная лаборатория, расположенная близ Нью-Йорка (США), и Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) в подмосковном городе Дубне (Россия).



Визуализация столкновения ядер золота при сверхвысоких энергиях

ВОПРОСЫ:

- Какие существуют современные методы исследования Вселенной?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на законы Кеплера.
- Как решать задачи на закон Хаббла.

ЗАДАЧА 1 Как известно, облачность на Венере настолько густая и плотная, что не видно никаких небесных светил. Можно ли, находясь на поверхности Венеры, установить факт её вращения вокруг своей оси?

Решение:

Убедиться в том, что Венера вращается вокруг своей оси, можно, например, наблюдая за характером колебаний математического маятника. Такой опыт в условиях Земли был впервые осуществлён в 1850 г. французским физиком Ж. Фуко. В результате вращения Земли вокруг своей оси наблюдался поворот относительно Земли плоскости колебаний маятника. Аналогичный опыт можно было бы осуществить и на Венере.

Ответ: можно.

ЗАДАЧА 2 Чему равен год на Юпитере, если большая полуось его орбиты 5,2 а.е.? Аналогичные величины для Земли считаются известными.

Дано:
 $a_{\text{Ю}} = 5,2 \text{ а.е.}$
 $a_{\text{З}} = 1 \text{ а.е.}$
 $T_{\text{З}} = 1 \text{ год}$

$T_{\text{Ю}} = ?$

Решение:

Согласно третьему закону Кеплера квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

$$\frac{T_{\text{Ю}}^2}{T_{\text{З}}^2} = \frac{a_{\text{Ю}}^3}{a_{\text{З}}^3} \rightarrow T_{\text{Ю}} = T_{\text{З}} \sqrt{\frac{a_{\text{Ю}}^3}{a_{\text{З}}^3}};$$

$$T_{\text{Ю}} = 1 \text{ год} \sqrt{\frac{(5,2 \text{ а.е.})^3}{(1 \text{ а.е.})^3}} = 11,86 \text{ года}.$$

Ответ: $T_{\text{Ю}} = 11,86 \text{ года}.$

ЗАДАЧА 3 Солнце со своей планетной системой вращается вокруг центра Галактики со скоростью 220 км/с. Сколько оборотов за всё время своего существования совершило Солнце? Возраст Солнца считать 4,5 млрд лет. Расстояние от центра Галактики до Солнца $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}$.

Дано:
 $v = 220 \text{ км/с}$
 $t = 4,5 \text{ млрд лет}$
 $R = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}$

$N = ?$

Решение:

Переведём время в секунды:

$$4,5 \text{ млрд лет} = 4,5 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ с}.$$

Период обращения Солнца: $T = \frac{2\pi R}{v}.$

Число оборотов $N = \frac{t}{T} = \frac{tv}{2\pi R}$;

$$N = \frac{1,4 \cdot 10^{17} \text{ с} \cdot 220\,000 \text{ м/с}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}} = 19,6.$$

Ответ: $N = 19,6$.

ЗАДАЧА 4 Из наблюдений известно, что параллакс самой яркой на ночном небе звезды Сириус равен $0,375''$. Определите расстояние от Земли до Сириуса в парсеках. Сколько времени свет идёт от звезды до Земли?

Дано:
 $p = 0,375''$
 $a = 1 \text{ а.е.}$

$d = ?$
 $t = ?$

Решение:

Расстояние от звезды до Земли выражается через параллакс звезды:

$$d = \frac{a}{\sin p},$$

где a — расстояние от Земли до Солнца.

Одна угловая секунда ($1''$) равна $\frac{1}{3600}$ градуса.

Выразим p в градусах и вычислим d :

$$d = \frac{1 \text{ а.е.}}{\sin(0,375/3600)} \approx 550\,040 \text{ а.е.};$$

$1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.}$, поэтому $d \approx 2,67 \text{ пк}$.

$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. год}$;

$t = 2,67 \text{ пк} \cdot 3,26 \text{ св. год} \approx 8,7 \text{ св. лет}$.

Ответ: $d \approx 2,67 \text{ пк}$; $t \approx 8,7 \text{ св. лет}$.

ЗАДАЧА 5 С какой скоростью удаляется от Земли самая близкая к нам галактика — туманность Андромеды, если расстояние до неё составляет $2,5 \text{ млн световых лет}$? Постоянная Хаббла $68 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$.

Дано:
 $R = 2,5 \cdot 10^6 \text{ св. лет}$
 $H = 68 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$

$v = ?$

Решение:

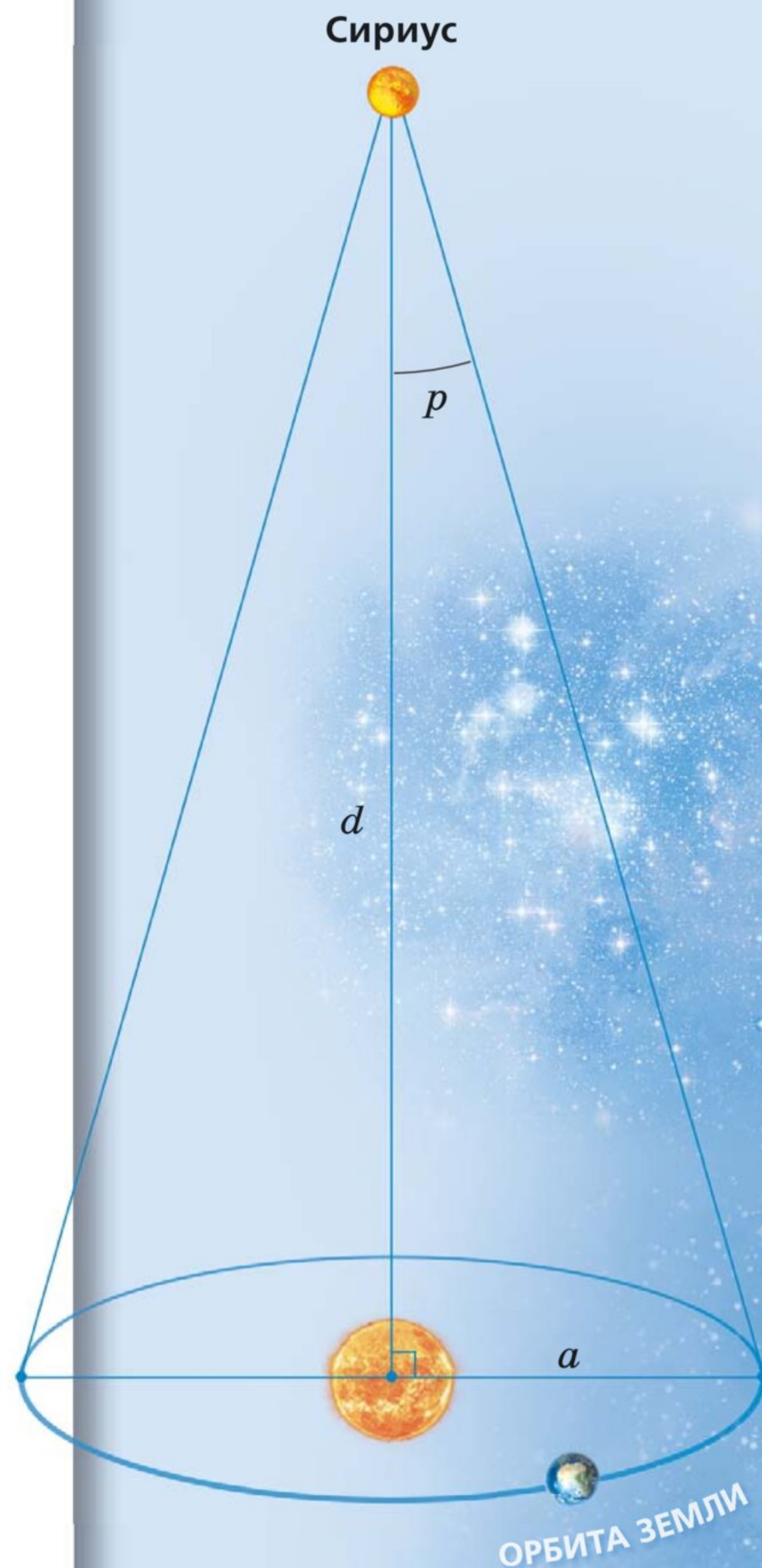
Переведём расстояние, выраженное в световых годах, в парсеки:

$$\begin{aligned} 2,5 \cdot 10^6 \text{ св. лет} &= 2,5 \cdot 10^6 / 3,26 = \\ &= 0,766 \cdot 10^6 \text{ пк} = 0,766 \text{ Мпк}. \end{aligned}$$

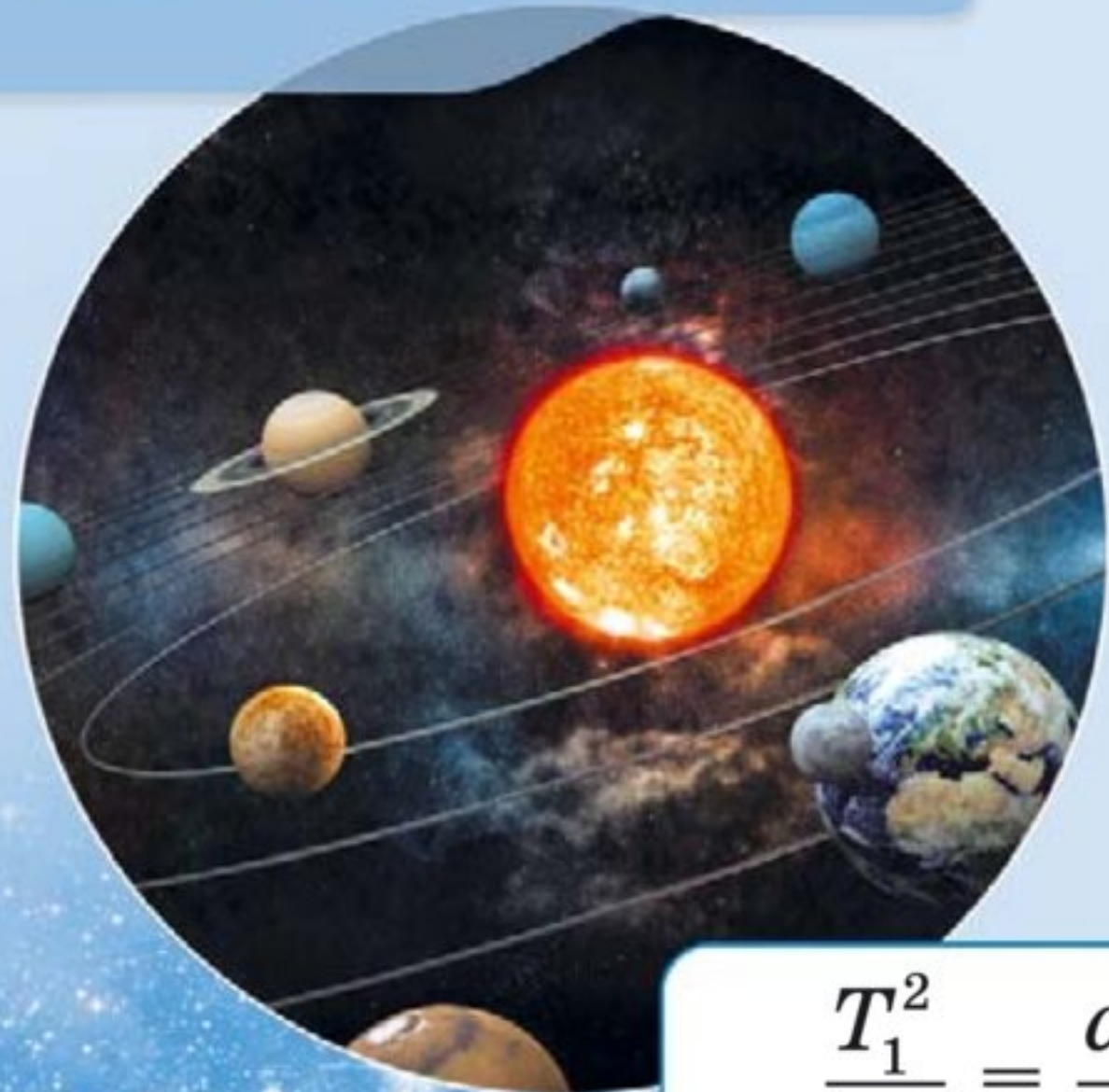
По закону Хаббла $v = HR$.

$$v = 68 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)} \cdot 0,766 \text{ Мпк} \approx 52 \text{ км/с}.$$

Ответ: $v \approx 52 \text{ км/с}$.



ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА



$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

ЗАКОН ХАББЛА

$$v = HR$$



Российская
астрономическая сеть
<http://gotourl.ru/13741>

Официальный сайт НАСА
<http://www.nasa.gov/>
<https://rusnasa.ru/>

Европейский центр
ядерных исследований
<http://home.cern/>

Учебно-научный центр
Объединённого Института
Ядерных Исследований
<http://gotourl.ru/13742>

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Законы Кеплера описывают законы движения планет. Орбита любой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Каждая планета движется так, что радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.
- Наше Солнце является лишь одной звездой из великого их множества. Все звёзды разделяются на спектральные классы.
- Зависимость спектрального класса (температуры) звезды от её светимости показывает диаграмма Рассела—Герцшпрунга. По диаграмме можно проследить эволюцию звёзд.
- Явление разбегания видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения получило название закона Хаббла.
- Теорию происхождения Вселенной называют теорией Большого взрыва.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

ПОДРОБНЕЕ...

Хокинг С., Млодинов Л. Кратчайшая история времени. / С. Хокинг. — М.: Амфора, 2008.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2011.

Гамов Г. Приключения Мистера Томпкинса. Вып. 85. / Г. Гамов. — М.: Бюро Квантум, 1993. — (Библиотечка «Квант»).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Возможно ли обобщение законов Кеплера на движение спутников вокруг планет?
- Существует ли связь между спектральным классом звезды и её массой?
- Для каких галактик — близких или далёких — закон Хаббла выполняется более точно?
- Существуют ли опытные данные, подтверждающие теорию Большого взрыва?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и пройдена последняя глава учебника, заканчивается ещё один год изучения физики. Вы познакомились со всеми основными разделами физики. Вы узнали о физических явлениях и законах, как вблизи поверхности Земли, так и в далёком космосе. Вы узнали о том, как гений Ньютона впервые связал движение тел вблизи поверхности Земли и движение планет единым законом — законом Всемирного тяготения. Это было первое великое обобщение в истории физики, которое в конечном итоге привело к современному пониманию картины окружающего мира.

За период изучения физики вы узнали о природе электрических и магнитных явлений и их взаимосвязи, а также об электромагнитном поле и электромагнитных волнах. На основе экспериментальных работ Фарадея и других выдающихся физиков того времени Максвеллом была создана единая электромагнитная теория, ставшая вторым великим обобщением в истории физики. Эта теория стала основой технического прогресса человечества в конце XIX — начале XX в. Подчеркнём ещё раз, что свет, который излучают Солнце и звёзды, имеет электромагнитную природу.

Современный мир, который движется к использованию достижений нанотехнологий, уже сейчас трудно представить без компьютеров, мобильных телефонов, телевидения и сложных медицинских устройств. Всё это базируется на достижениях квантовой физики.

Мы рассказали вам о Вселенной, о звёздах и далёких галактиках. Основные фундаментальные законы физики едины и работают от маленьких расстояний внутри атома до огромных масштабов Вселенной. Мириады звёзд, существующих во Вселенной, являются теми «термоядерными котлами», в которых из простейших частиц вещества рождаются атомы различных химических элементов, которые являются строительным материалом природы, окружающей нас. Именно эти элементы формируют сложные молекулы, из которых состоят в том числе и живые организмы.

С достижениями в области физической науки также связаны надежды на решение разнообразных проблем, стоящих сегодня перед человечеством. Это — проблемы в области экологии, проблемы новых источников энергии, проблемы медицинской диагностики и многое другое.

Нам хотелось бы закончить учебник цитатой стихотворения М. В. Ломоносова:

Открылась бездна звёзд полна;
Звёздам числа нет, бездне дна.

Удачи вам в этом нелёгком, но очень интересном деле изучения физики!



РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

ЦЕЛЬ:

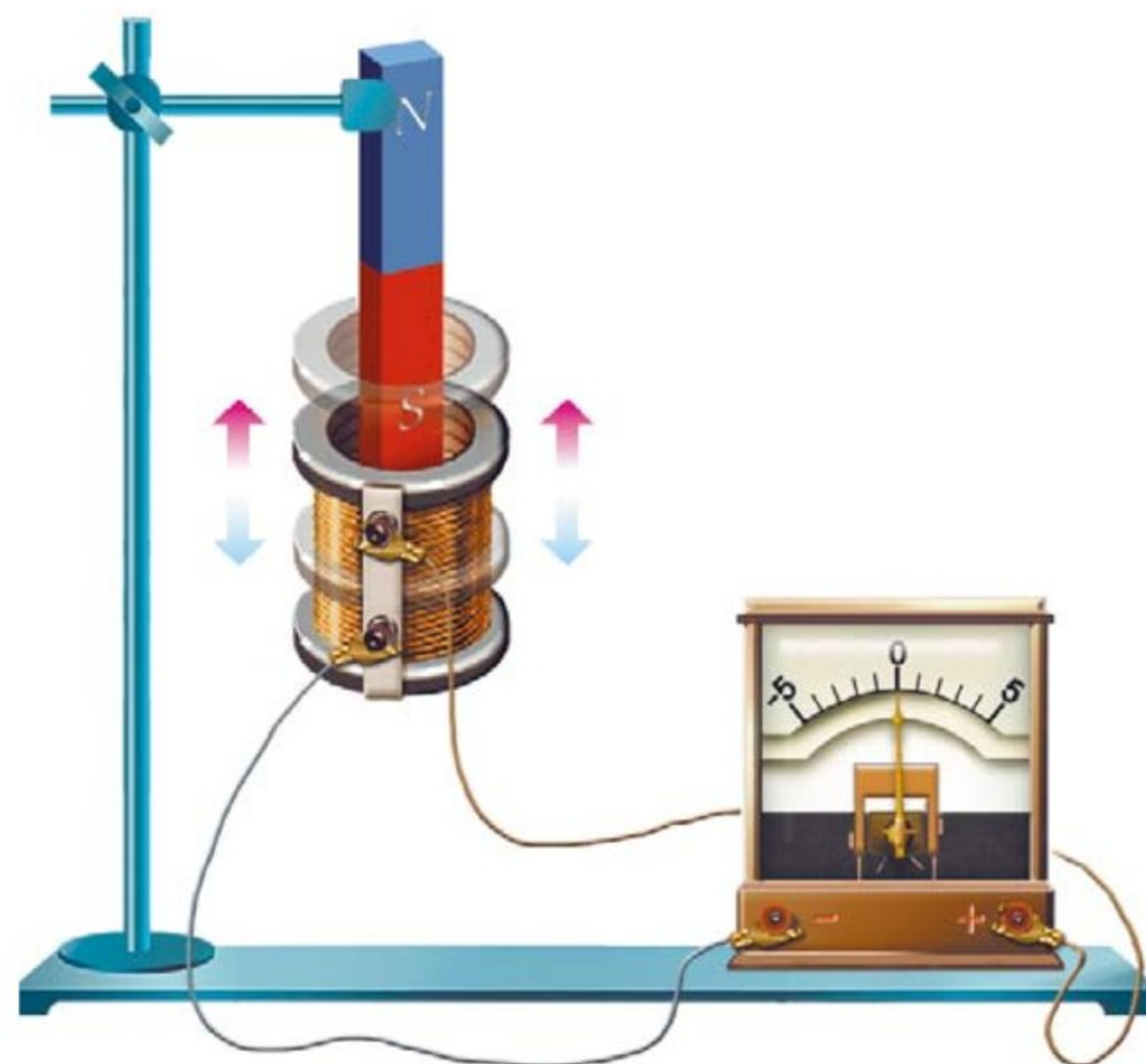
Изучить явление электромагнитной индукции, получить индукционный ток и проверить выполнение правила Ленца.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Миллиамперметр, полосовой магнит, катушка-моток, соединительные провода.

ХОД РАБОТЫ:

- Закрепите катушку в лапке штатива и подключите её к миллиамперметру.
- Выполните следующие действия с магнитом и катушкой:
 - равномерно введите в катушку северный (южный) полюс магнита, затем извлеките магнит из катушки;
 - введите и извлеките магнит из катушки с разной скоростью (быстро, медленно);
 - сложите два магнита одноимёнными полюсами. Введите и извлеките их из катушки с разной скоростью (быстро, медленно);
 - возьмите катушку с меньшим (большим) числом витков. Повторите любое из описанных выше действий с этой катушкой.
- Для каждого опыта:
 - запишите максимальное значение силы индукционного тока I_i ;
 - сделайте схематичный рисунок катушки и магнита;
 - на рисунке укажите направление индукционного тока. Направление индукционного тока определяется по направлению отклонения стрелки миллиамперметра и по направлению намотки витков катушки;
 - укажите направление вектора магнитной индукции поля, созданного индукционным током в катушке (определяется по правилу правой руки);
 - укажите направление линий индукции магнита;
 - установите характер изменения магнитного потока в зависимости от направления движения магнита.



Номер опыта	Действия с магнитом и катушкой	I_i , мА	Схематичный рисунок
1			
2			
3			
...			

- Выполняется ли правило Ленца в проделанных опытах? Сделайте вывод.

РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НИТЯНОГО МАЯТНИКА

ЦЕЛЬ:

Определить ускорение свободного падения с помощью нитяного маятника.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Штатив, шарик, нить, секундомер (или часы с секундной стрелкой), линейка.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Период колебаний математического маятника можно определить по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Таким образом, измерив длину нити и период колебаний, можно вычислить ускорение свободного падения:

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

Для более точного вычисления периода колебаний рекомендуется повторить опыт несколько раз, измеряя время t , за которое маятник совершит $N = 20-30$ колебаний. Затем вычислить среднее время $t_{\text{ср}}$: $t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n}$, где n — число опытов по измерению времени N колебаний.

Относительная погрешность измерения g :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_l + 2\varepsilon_t, \text{ где } \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l},$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}}}, \text{ где } \Delta t_{\text{ср}} = \frac{|t_1 - t_{\text{ср}}| + |t_2 - t_{\text{ср}}| + \dots + |t_N - t_{\text{ср}}|}{n}.$$

Абсолютная погрешность измерения g : $\Delta g = \varepsilon_g g_{\text{ср}}$.

ХОД РАБОТЫ:

- Установите штатив на краю стола. Прикрепите нить длиной около 1 м к шарiku и подвесьте его к штативу. Измерьте длину нити l маятника от точки закрепления нити до центра шарика.
- Отклоните шарик от положения равновесия на 4–5 см и отпустите. Измерьте время t , за которое маятник совершает $N = \underline{\hspace{2cm}}$ полных колебаний.
- Проведите ещё $n = 3-5$ таких измерения.
- Вычислите среднее значение времени $t_{\text{ср}}$.
- Вычислите среднее значение периода колебаний нитяного маятника по формуле $T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{ср}}}{N}$.
- Вычислите ускорение свободного падения: $g_{\text{ср}} = 4\pi^2 \frac{l}{T_{\text{ср}}^2}$.

Номер опыта	Измерения			Вычисления		
	l , м	N	t , с	$t_{\text{ср}}$, с	$T_{\text{ср}}$, с	$g_{\text{ср}}$, м/с ²

- Вычислите относительные и абсолютные погрешности измерений l , t и $g_{\text{ср}}$.
- Результат измерения запишите с учётом вычисленных погрешностей:

$$g = g_{\text{ср}} \pm \Delta g.$$

- Сделайте вывод. Отличается ли найденное значение ускорения свободного падения от известного $g = 9,8 \text{ м/с}^2$? С чем это может быть связано?

РАБОТА № 3

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
СВЕДЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

Определить показатель преломления стекла.

Стеклянная пластинка с плоскопараллельными гранями, деревянная дощечка (или картон), лист бумаги, 4 булавки, карандаш, линейка.

Пусть свет падает на плоскую стеклянную пластинку из воздуха в точку O под углом α . Обозначим угол преломления γ . Показатель преломления стекла относительно воздуха определяется по

формуле $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$.

Отметим на падающем и преломлённом лучах точки A и B соответственно так, чтобы $AO = OB$. Из точек A и B опустим перпендикуляры AC и BD к перпендикуляру, проведённому к грани пластинки (пунктирная линия). Рассмотрим прямоугольные треугольники $\triangle AOC$ и $\triangle BOD$:

$$\sin \alpha = \frac{AC}{AO}; \quad \sin \gamma = \frac{BD}{OB}.$$

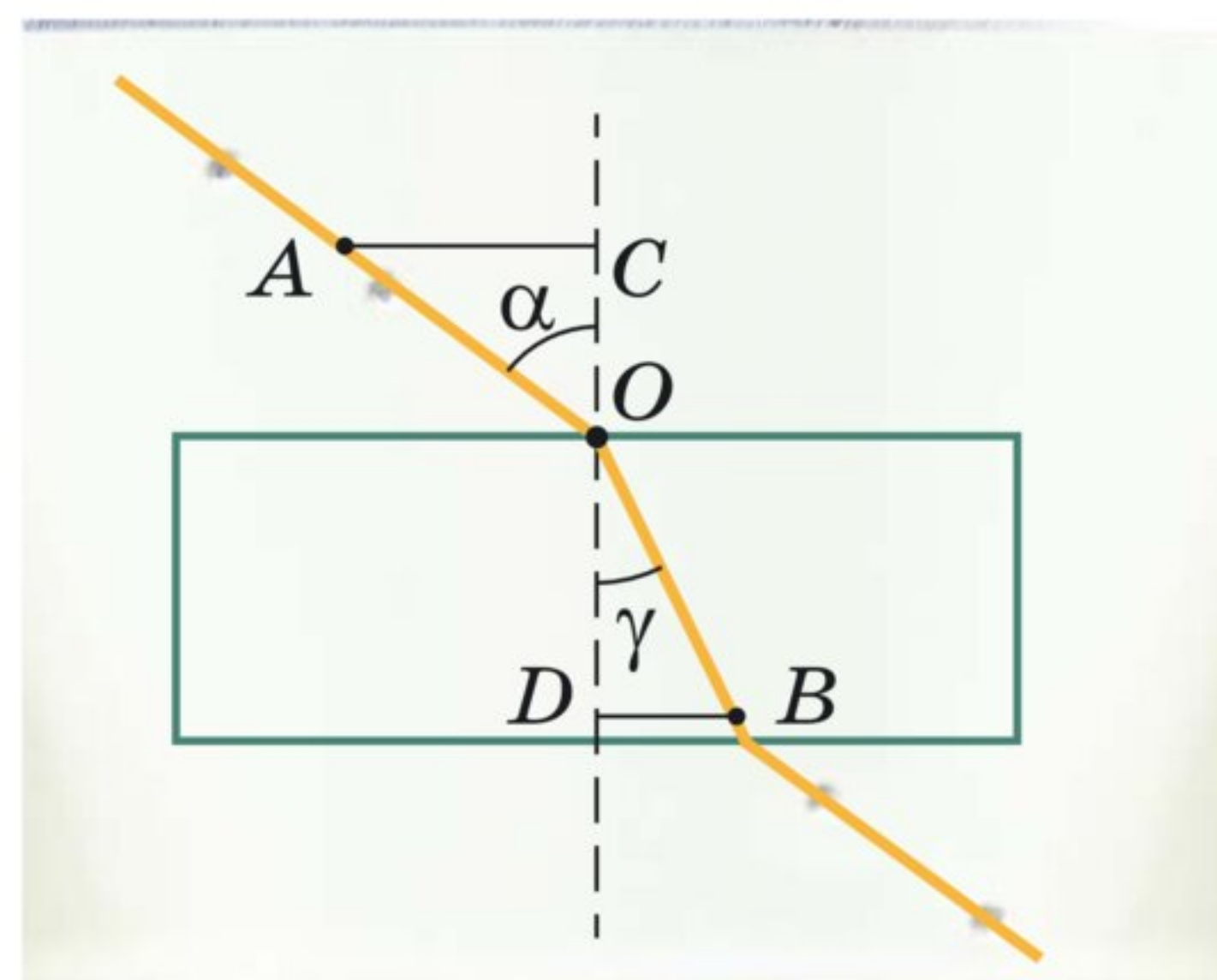
Учитывая, что $AO = OB$, получим $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{AC}{BD}$.

Длины отрезков AC и BD можно измерить с помощью линейки.

Относительная погрешность измерения n :

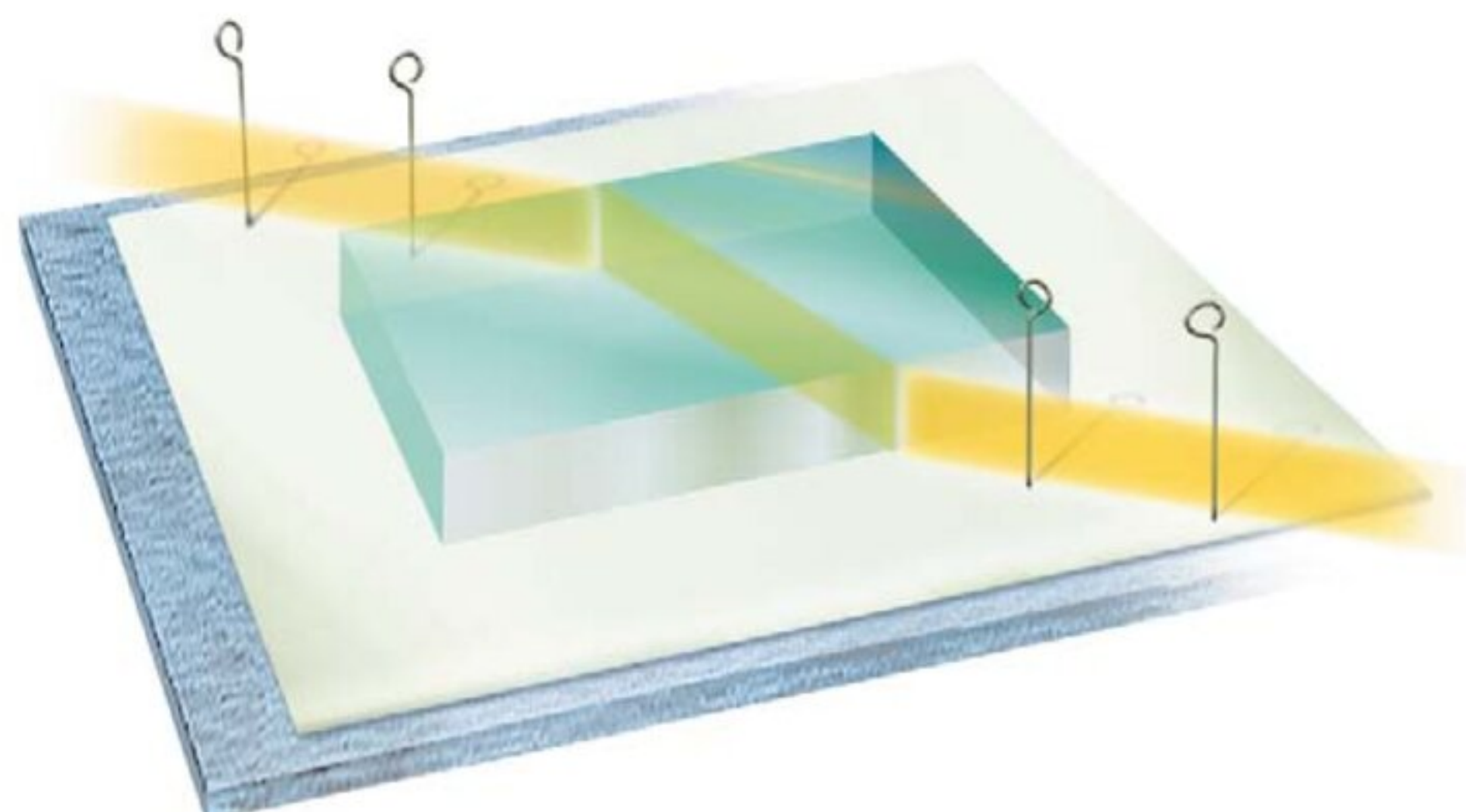
$$\varepsilon = \frac{\Delta AC}{AC} + \frac{\Delta BD}{BD}, \quad \Delta AC = \Delta BD = 1 \text{ мм}.$$

Абсолютная погрешность измерения n : $\Delta n = \varepsilon n$.



ХОД РАБОТЫ:

- Прикрепите лист бумаги к дощечке (или картону). Сверху на бумагу положите стеклянную пластинку. Карандашом прочертите линии вдоль преломляющих граней пластинки — границы раздела двух сред (воздух–стекло, стекло–воздух).



- По одну сторону от пластинки воткните две булавки так, чтобы одна из них касалась пластинки, а другая располагалась так, чтобы линия, проведённая через булавки, образовывала с гранью пластинки некоторый угол.
- Поднесите дощечку к глазам и рассмотрите булавки через пластинку. Из-за преломления света вы увидите мнимое изображение булавок, не совпадающее с их истинным положением. Перед ближайшей к вам гранью воткните ещё две булавки так, чтобы они лежали на одной прямой с мнимыми изображениями воткнутых ранее булавок.
- Выньте все булавки и уберите стеклянную пластинку. Через отверстия от булавок проведите отрезки прямых — луч падающий и луч, прошедший через пластинку. Образовавшиеся точки пересечения лучей с гранями пластинки соедините отрезком прямой. Это преломлённый луч. В точке падения луча проведите перпендикуляр к грани пластинки.
- Сделайте необходимые измерения и вычислите показатель преломления стекла $n_{\text{пр}}$ указанным выше способом.
- Вычислите относительную ε и абсолютную Δn погрешности измерений показателя преломления.
- Результат измерения запишите с учётом вычисленных погрешностей:
 $n = n_{\text{пр}} \pm \Delta n$.

Номер опыта	Измерения		Вычисления			
	AC , мм	BD , мм	$n_{\text{пр}}$	ε , %	Δn	n

- Повторите опыт и вычисления для другого угла падения.
- Сравните полученные результаты. Сделайте вывод.

РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ И ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЛИНЗЫ

ЦЕЛЬ:

Определить фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы.

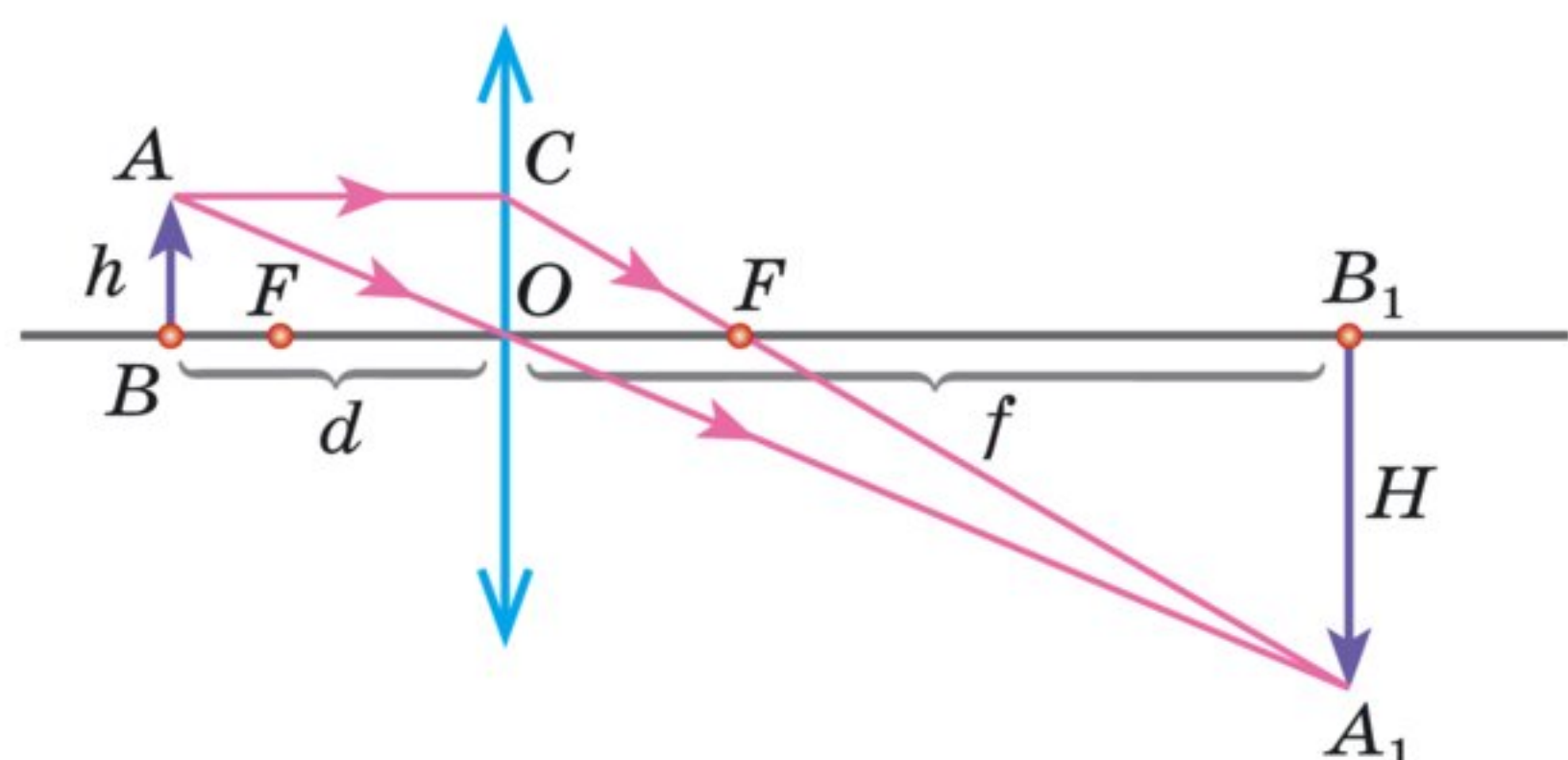
ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Собирающая линза, электрическая лампочка на подставке с колпачком, источник тока, соединительные провода, экран, линейка длиной 1 м.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Расстояние от предмета до линзы d , расстояние от линзы до изображения f и фокусное расстояние F связаны между собой формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$



С помощью этой формулы можно определить фокусное расстояние линзы, если известны расстояние от предмета до линзы и расстояние от линзы до изображения.

Оптическая сила линзы — это величина, обратная её фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}.$$

С учётом формулы тонкой линзы $D = \frac{d + f}{df}$.

Относительная погрешность измерения оптической силы линзы вычисляется по формуле

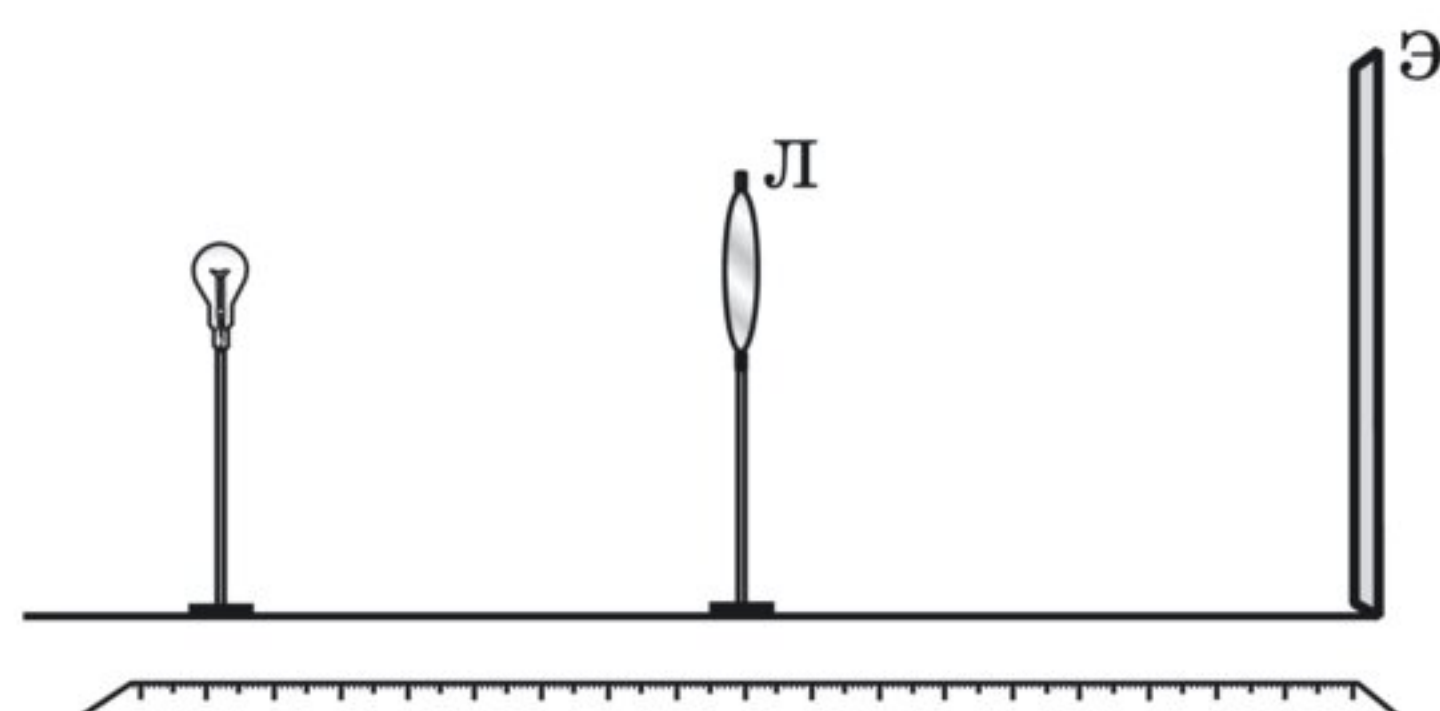
$$\varepsilon_D = \varepsilon_{d+f} + \varepsilon_{df} = \frac{\Delta d + \Delta f}{d + f} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta f}{f}, \text{ где } \Delta d = \Delta f = 1 \text{ мм.}$$

Абсолютная погрешность измерения оптической силы линзы:

$$\Delta D = \varepsilon D.$$

ХОД РАБОТЫ:

- Подключите лампочку к источнику тока. Наденьте на лампочку колпачок.
- Расположите линзу между включённой лампочкой и экраном вдоль линейки.
- Плавнo перемещая линзу вдоль линейки, получите на экране чёткое уменьшенное изображение буквы с колпачка лампы.
- Измерьте расстояние d от лампочки до линзы и расстояние f от линзы до экрана с точностью до 1 мм.
- Перемещая линзу, получите на экране увеличенное, а затем равное изображение буквы. В каждом случае измерьте расстояния d и f .
- Для каждого опыта вычислите фокусное расстояние линзы F , пользуясь формулой тонкой линзы.
- Найдите среднее фокусное расстояние $F_{\text{ср}}$.
- Для каждого опыта по найденным фокусным расстояниям, выраженным в метрах, вычислите оптическую силу линзы D и найдите её среднее значение $D_{\text{ср}}$.
- Вычислите относительную ε и абсолютную ΔD погрешности измерений оптической силы линзы.



Номер опыта	Изображение	d , м	f , м	F , м	$F_{\text{ср}}$, м	D , дптр	$D_{\text{ср}}$, дптр
1	Уменьшенное						
2	Увеличенное						
3	Равное						

- Результат запишите с учётом погрешности измерений:

$$D = D_{\text{ср}} \pm \Delta D.$$

- Сделайте вывод.

РАБОТА № 5

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Получить спектр от дифракционной решётки, определить длину световой волны для красного и фиолетового света спектра.

Прибор для определения длины световой волны, лампа накаливания.

Прибор для определения длины световой волны состоит из направляющей линейки, с одной стороны которой прикреплён держатель с установленной в него дифракционной решёткой, а с другой стороны — чёрный экран с узкой вертикальной щелью, который может свободно перемещаться вдоль линейки. На линейке и на экране нанесена шкала с миллиметровыми делениями. Установим за экраном источник света (например, лампу накаливания) так, чтобы, если смотреть сквозь решётку и щель, была видна нить лампы накаливания.

Тогда на экране можно наблюдать симметрично расположенные по обе стороны от щели дифракционные спектры первого, второго и т. д. порядков.

Положение максимумов дифракционного спектра определяется формулой

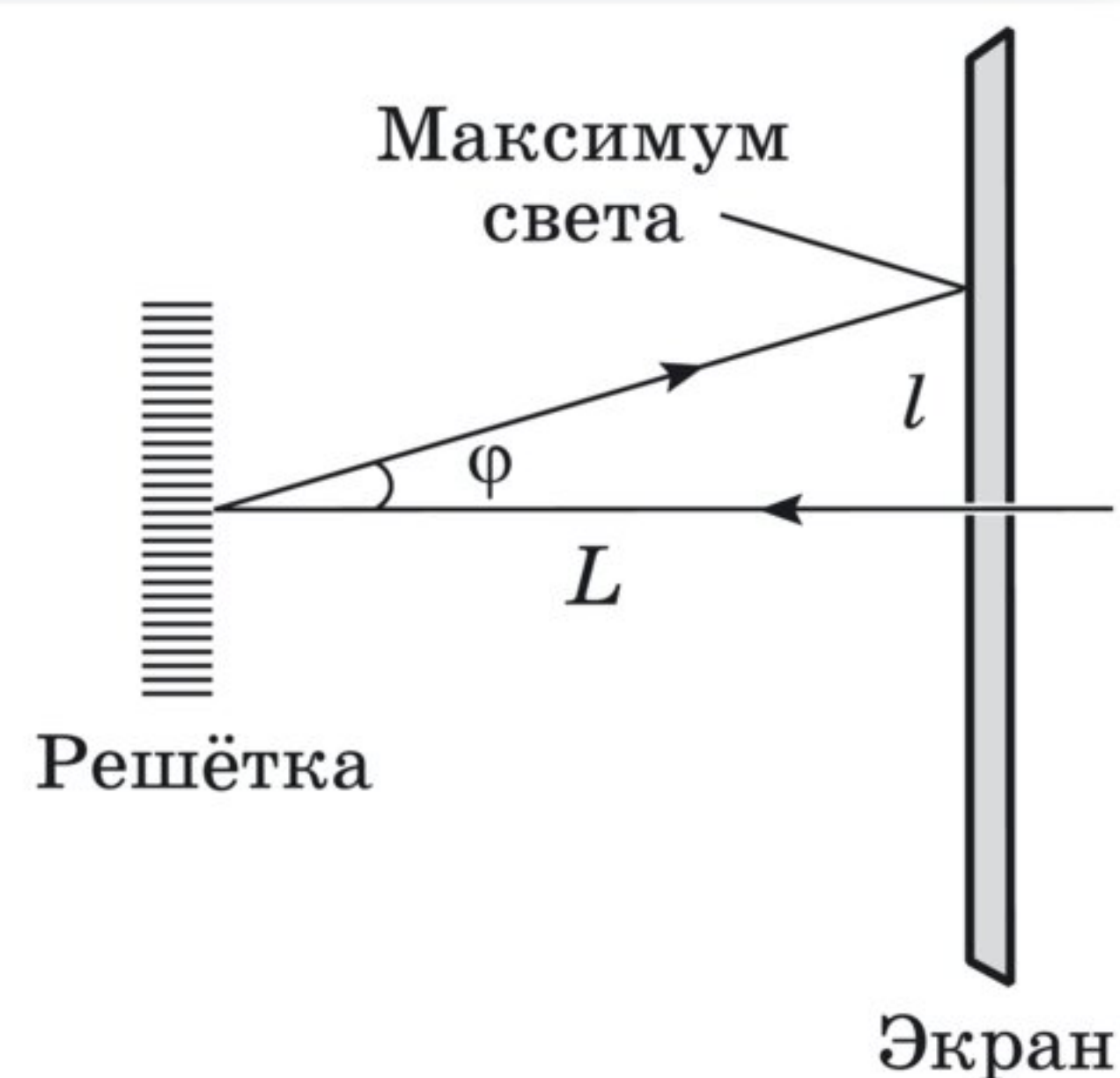
$$d \sin \varphi = n \lambda,$$

где d — период дифракционной решётки, φ — угол, под которым наблюдается максимум интенсивности света соответствующей длины волны, n — порядок спектра, λ — длина волны.

Так как максимумы спектра первого порядка наблюдаются под малыми углами, то можно считать

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L},$$

где l — расстояние от щели до выбранной линии спектра (измеряется по шкале на экране), L — расстояние от дифракционной решётки до экрана (измеряется по шкале на линейке).



Тогда длину волны для спектра первого порядка можно вычислить по формуле

$$\lambda = d \frac{l}{L}.$$

ХОД РАБОТЫ:

- Соберите измерительную установку. Установите в держатель дифракционную решётку с периодом $d = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.
- Установите экран на максимально возможном расстоянии от решётки. За экраном поставьте лампу накаливания и включите её.
- Приблизив глаз к дифракционной решётке, установите прибор и лампу так, чтобы сквозь щель в экране была видна нить лампы накаливания. Тогда на экране можно наблюдать дифракционные спектры.
- Если полосы спектра располагаются не параллельно шкале экрана, то это означает, что штрихи на решётке не параллельны нити накала лампы. В этом случае слегка поверните решётку в держателе, чтобы полосы спектра располагались параллельно шкале.
- По линейке измерьте расстояние L между экраном и держателем с дифракционной решёткой.

Цвет полосы спектра	Измерения				Вычисления	
	d , м	L , м	l_1 , м	l_2 , м	$l_{\text{ср}}$, м	$\lambda_{\text{ср}}$, м
Красный						
Фиолетовый						

- По шкале на экране измерьте расстояния l_1 и l_2 между щелью и серединой красной полосы спектра первого порядка, расположенной слева и справа от щели. Вычислите среднее значение $l_{\text{ср}} = \frac{l_1 + l_2}{2}$.
- Вычислите длину волны $\lambda_{\text{ср}}$ красного света.
- Сделайте аналогичные измерения и вычислите длину волны $\lambda_{\text{ср}}$ фиолетового света.
- Сравните полученные значения с табличными значениями для длин волн красного и фиолетового света.

Цвет полосы спектра	Измерения				Вычисления	
	d , м	L , м	l_1 , м	l_2 , м	$l_{\text{ср}}$, м	$\lambda_{\text{ср}}$, м
Красный						
Фиолетовый						

- Повторите опыт с дифракционной решёткой другого периода. С использованием какой дифракционной решётки длина волны определяется наиболее точно?
- Сделайте вывод.

РАБОТА № 6

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СВЕТА

ЦЕЛЬ:

Наблюдать волновые свойства света: интерференцию, дифракцию и поляризацию.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Электрическая лампа с прямой нитью накала (одна на класс), сосуд с мыльным раствором (чтобы мыльная плёнка получилась более прочной, добавьте в мыльный раствор несколько капель глицерина), рамка (или кольцо) из проволоки, штангенциркуль, плотный лист бумаги, иголка, 2 поляроида, кусочек целлофана или скотча, поляроидные очки.

ХОД РАБОТЫ:

Задание 1. Наблюдение интерференции света на мыльной плёнке

- Поместите проволочную рамку в мыльный раствор и осторожно поднимите её так, чтобы плоскость рамки стала вертикальной. Пронаблюдайте образование тёмных и светлых горизонтальных полос и изменение их ширины по мере изменения толщины плёнки. Объясните наблюдаемое явление.
- Осветите мыльную плёнку на рамке светом от лампы (или от окна). Наблюдайте окрашивание полос в спектральные цвета: вверху — в синий, внизу — в красный. Обратите внимание на то, что полосы не остаются на месте, а, расширяясь и сохраняя свою форму, смещаются вниз. Объясните наблюдаемое явление.
- Осторожно поверните рамку в вертикальной плоскости. Изменяется ли ориентация и форма полос?
- Зарисуйте картины интерференции, которые вы наблюдали в ходе работы.

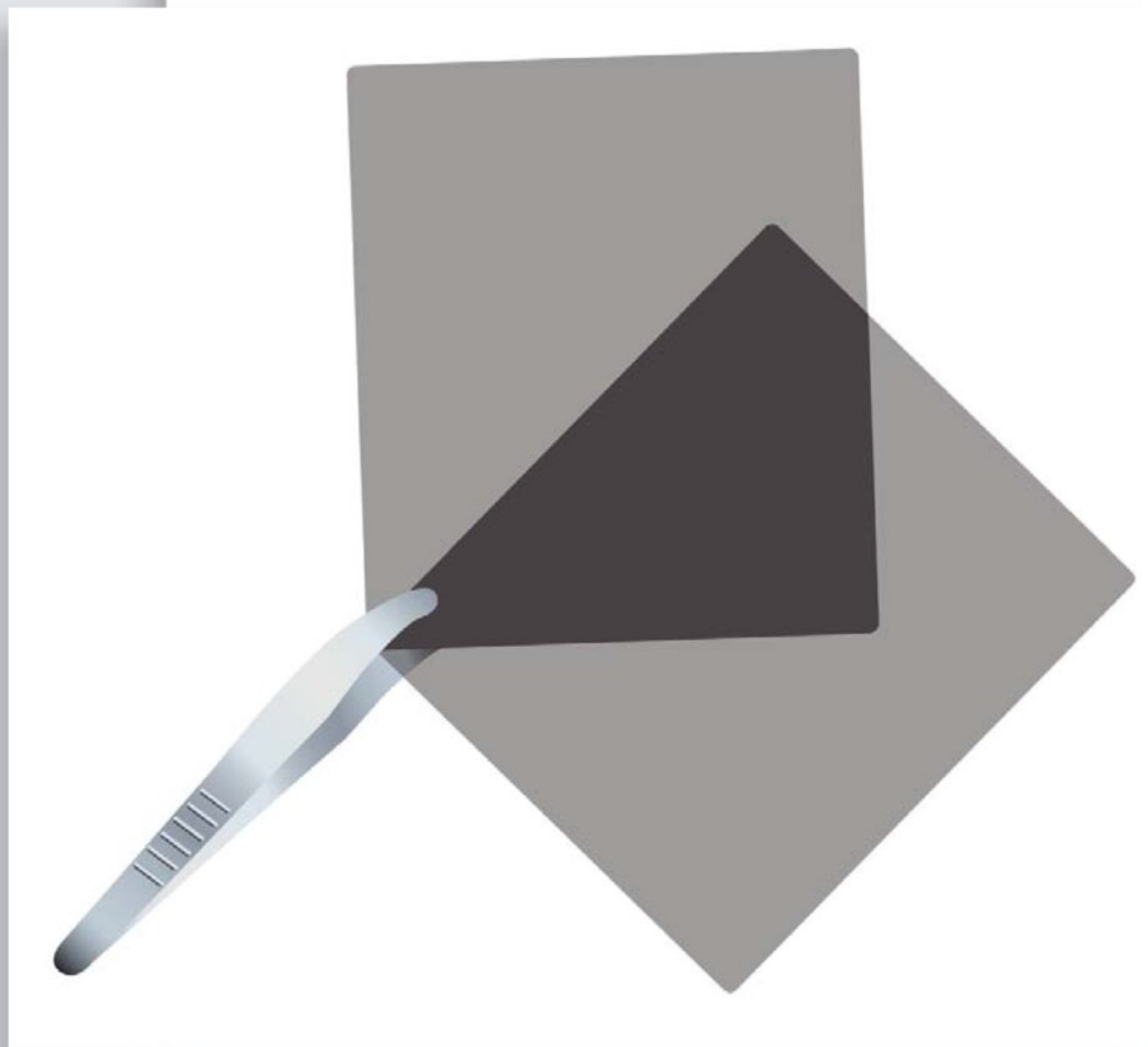
Задание 2. Наблюдение дифракции света на узкой щели и на малом отверстии

- Сдвиньте ползунок штангенциркуля до образования между губками щели шириной 0,5 мм. Для образования узкой щели можно между губками штангенциркуля вставить лист бумаги, а затем его вынуть.
- Поднесите штангенциркуль вплотную к глазу, располагая щель вертикально. Смотрите через щель на вертикально расположенную нить лампы накаливания. Наблюдайте по обе стороны от нити параллельные ей полосы, окрашенные в спектральные цвета. Объясните наблюдаемое явление.
- Плавно поверните штангенциркуль вокруг вертикальной оси. Как при этом изменяется дифракционная картина?
- Измените ширину щели в пределах 0,05—0,8 мм. Как изменяется расположение и ширина полос, если щель сделать уже? Шире?
- С помощью иголки сделайте в листе бумаги малое отверстие.
- Поднесите отверстие в листе вплотную к глазу. Смотрите через него на яркий источник света (лампу накаливания). Вокруг отверстия наблюдайте

кольца, окрашенные в спектральные цвета. Объясните наблюдаемое явление.

- С помощью иглки увеличьте диаметр отверстия. Как изменилась дифракционная картина?
- Зарисуйте картины дифракции, которые вы наблюдали в ходе работы.

Задание 3. Наблюдение поляризации света



- Включите лампу накаливания или фонарик. Возьмите поляроид и посмотрите сквозь него на источник света. Поворачивайте поляроид вокруг своей оси. Наблюдайте, как изменяется яркость.

- Возьмите второй поляроид и наложите его на первый. Наблюдайте прохождение света через оба поляроида. Поворачивайте один из поляроидов вокруг своей оси. Наблюдайте уменьшение яркости — в месте пересечения поляроидов образуется темнеющее пятно. При каком положении поляроидов свет перестаёт проходить через них?

- Посмотрите на источник света через оба поляроида и также удостоверьтесь, что свет не проходит через поляроиды. Объясните наблюдаемое явление.

- Зажмите кусочек целлофана или скотча между скрещёнными поляроидами. Посмотрите сквозь них на источник света. Наблюдайте, что свет теперь проходит через поляроиды.

- Возьмите поляроид и посмотрите сквозь него на экран ноутбука, ЖК-телевизора или телефона с ЖК-экраном (для лучшего наблюдения экран устройства должен быть светлым). Поворачивайте поляроид вокруг своей оси. Наблюдайте, как изменяется яркость экрана сквозь поляроид. Объясните наблюдаемое явление.

- Между ЖК-экраном и поляроидом поместите смятый кусочек целлофана или скотча. Поворачивая поляроид вокруг своей оси, рассмотрите целлофан в поляризованном свете. Наблюдайте окрашивание целлофана в спектральные цвета.

- Поместите между ЖК-экраном и поляроидом любой предмет из прозрачной пластмассы. Рассмотрите его в поляризованном свете.

- Возьмите поляроидные очки. С помощью поляроида или ЖК-экрана установите, как направлена их ось поляризации.

- Сделайте выводы.

РАБОТА № 7

ЦЕЛЬ:

НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

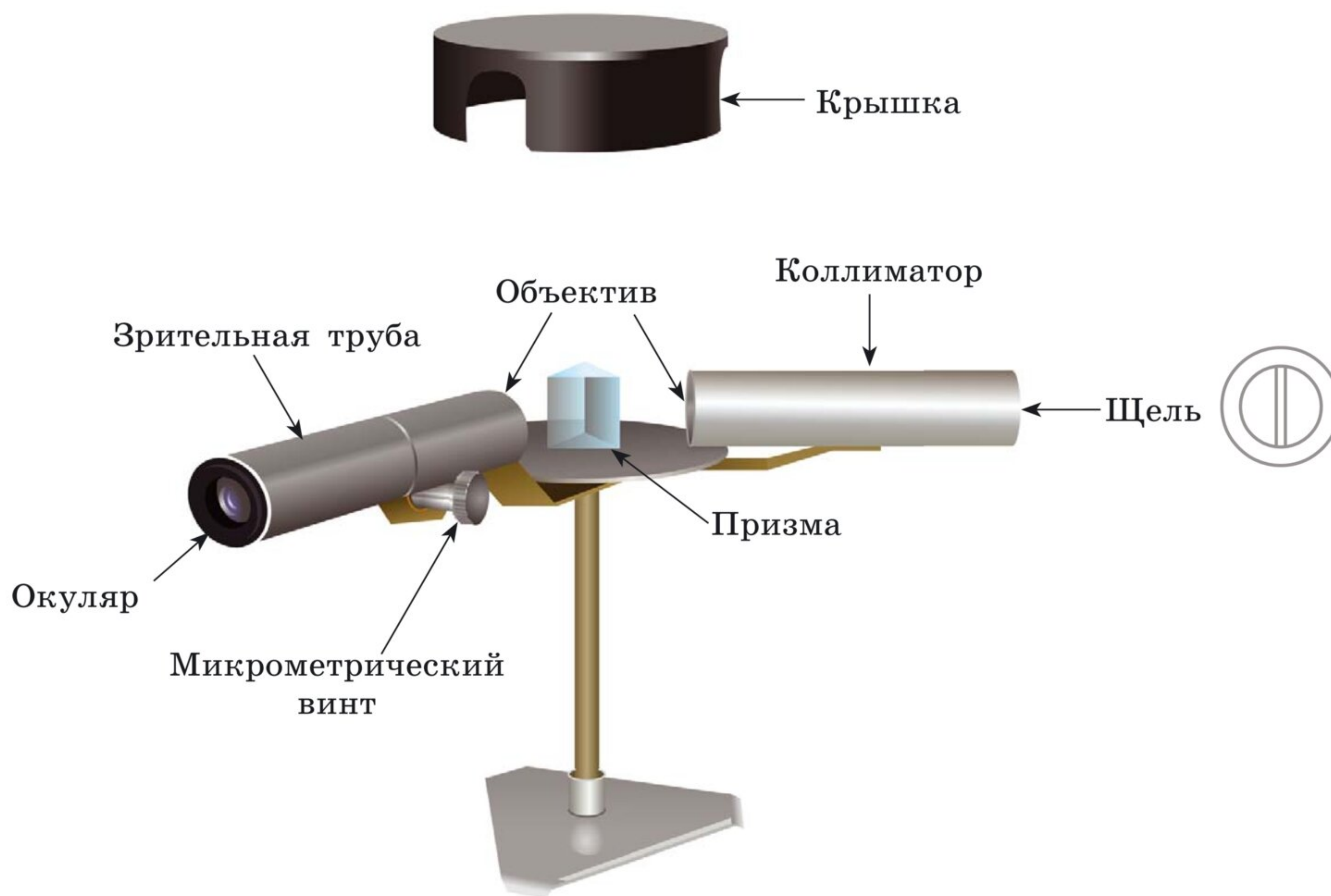
Наблюдение сплошного спектра излучения электрической лампы и линейчатых спектров излучения ионизированных газов.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Спектроскоп двухтрубный, набор спектральных трубок (водород, неон, гелий), прибор для зажигания спектральных трубок, источник тока, лампа накаливания, ключ, реостат, соединительные провода, штатив, таблицы со спектрами излучения газов, находящихся в спектральных трубках.

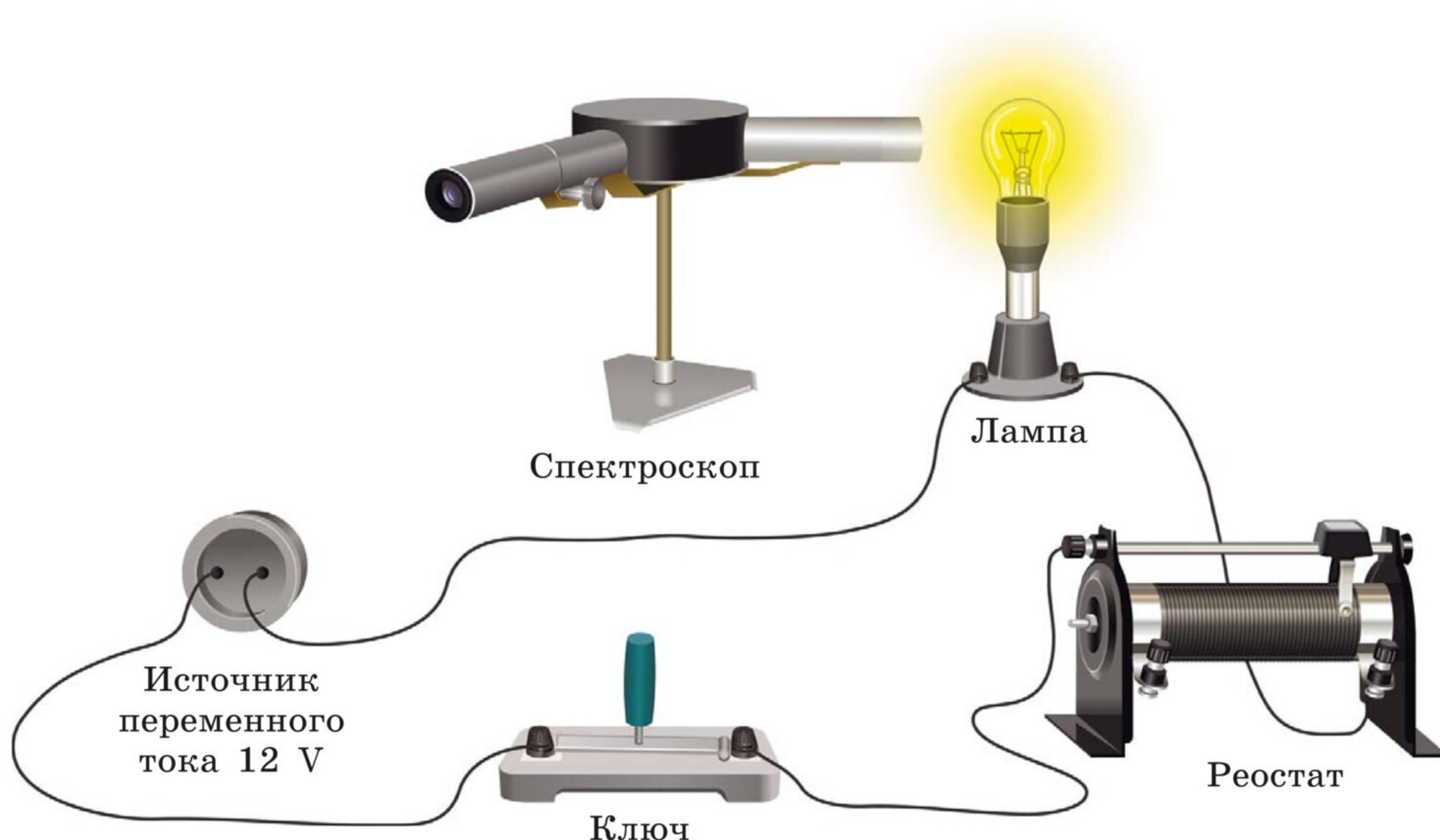
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Спектроскоп двухтрубный состоит из окуляра, зрительной трубы, объективов, коллиматора, щели и микрометрического винта. При наблюдении спектров щель направляют на источник света и с помощью объективов и окуляра добиваются появления чёткого изображения. Вращением винта меняют видимую часть спектра.



ХОД РАБОТЫ:

- Укрепите спектроскоп в штативе таким образом, чтобы щель его коллиматора была расположена вертикально.
- Соберите электрическую цепь, последовательно соединив лампу накаливания, реостат и источник тока.
- Установите спектроскоп перед лампой накаливания так, чтобы её нить накаливания была на высоте щели на расстоянии нескольких сантиметров от неё.



- Замкните цепь и включите лампу. Наблюдайте сплошной спектр излучения нити при полном накале лампы.
- Постепенно уменьшая накал нити с помощью реостата, наблюдайте ослабление яркости спектра и постепенное исчезновение спектральных цветов.
- Какой спектр наблюдается от света лампы накаливания? Запишите последовательность наблюдаемых цветов в спектре.
- Вставьте трубку с исследуемым газом в держатель прибора для зажигания спектральных трубок и включите прибор.
- Какие спектры наблюдаются при исследовании газов в трубках? Зарисуйте вид спектров для различных газов.
- Сделайте выводы.



ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аккомодация 93

Альтернативные источники энергии 55

Амплитуда колебаний 33

Амплитудная модуляция 77

Античастица 180

Атомное ядро 166

Близорукость 93

Взаимодействие

— гравитационное 182

— магнитное 10

— сильное 182

— слабое 182

— фундаментальное 182

— электрическое 10

— электромагнитное 72, 182

Волны

— звуковые 66

— механические 62

— поперечные 62

— продольные 62

— световые 106, 115

— упругие 62

— электромагнитные 73, 74, 120

Волоконная оптика 87

Вселенная 213

Высота звука 67

Галактики 208

Генератор переменного тока 49

Гипотеза

— Ампера 11

— Максвелла 72

— Планка 147

Глаз 92

Громкость звука 67

Давление света 148

Дальнозоркость 93

Движение

— заряженной частицы в магнитном поле 17

— периодическое 32

Действующие значения 52

Детектирование колебаний 77

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела 205

Дисперсия 104

Дифракционная решётка 112

Дифракция 69

— света 110

Длина

— волны 64

— световой волны 116

Дозиметрия 178

Единицы

— длины в астрономии 195

— магнитной индукции 13

— потока магнитной индукции 19

— силы тока 11

Закон

— Кеплера 193

— независимости распространения света 83

— отражения света 83, 106

— преломления света 84, 106

— прямолинейного распространения света 82

— радиоактивного распада 165

— сложения скоростей 134

— фотоэффекта 145

— Хаббла 212

— электромагнитной индукции 21

Замедление времени 133

Звёзды 204, 206

Зрение

— биноклярное 93

Излучение

— абсолютно чёрного тела 146

— ионизирующее 178

— радиоактивное 163, 178

— реликтовое 121

— рентгеновское 120

— самопроизвольное и вынужденное 156

Изотоп 166

Индуктивность 24

Индукция магнитного поля 12

Интерференция 68

— света 108, 112

Камера Вильсона 185

Квазары 211

Квантовая механика 155

Кварк 181

Когерентность 109

Колебания

— вынужденные 40, 48

— гармонические 35, 36

— затухающие 37

— звуковые 66

- механические 32
- свободные 32, 46
- электромагнитные 46, 48
- Колебательный контур 46
- Корпускулярно-волновой дуализм 149
- Красное смещение 121

Лазер 156

Линза

- рассеивающая 89, 91
- собирающая 89, 91
- тонкая 89

Лупа 94

Маятник

- математический 34
- пружинный 34

Млечный Путь 211

Микроскоп 95

Модель

- атома Бора 152
- атома планетарная 151
- атома Томсона 150
- ядра 167

Мощность переменного тока 52

Нейтрон 167

Одновременность 128

Оптическая плотность среды 84

Опыт

- Ампера 10
- Галилея по измерению скорости света 102
- Герца 75
- Гримальди 110
- Кюри 162
- Лебедева 148
- Майкельсона 102
- Резерфорда 150
- Рёмера 102
- Фарадея 18
- Физо 103
- Эрстеда 10
- Юнга 108, 110

Отражение света 83, 87

- полное внутреннее 86

Период

- дифракционной решётки 113
- колебаний 33, 35

Плоское зеркало 88

Показатель преломления 85

Поле

- вихревое 22
- индукционное 22
- магнитное 12, 14, 16, 48
- электрическое 22

Поляризация света 115

Постулаты

- Бора 152
- СТО 128

Поток магнитной индукции 19

Правило

- буравчика 13, 23
- левой руки 15, 17
- Ленца 20

Преломление света 84

Преобразования

- Галилея 130
- Лоренца 131

Принцип

- Гюйгенса 106
- Гюйгенса—Френеля 111

Протон 166

Радиоактивность 162

Радиосвязь 76

Реактор 174

Резонанс 40

Релятивистская механика 137

Самоиндукция 24

Световой луч 82

Сила

- Ампера 14
- Лоренца 16
- оптическая 91
- ядерная 168

Скорость

- звука 66
- распространения волны 65
- света 102, 128

Сокращение длины 132

Солнечная система 196

Солнце 200

Спектр

- испускания 119
- линейчатый 118
- поглощения 119
- сплошной 118
- электромагнитного излучения 120

Спектральный анализ 119

Стандартная модель 184

Счётчик Гейгера 184

Телескоп 96, 216

Тембр звука 67

Тень 82

Теория

— Большого взрыва 214

— великого объединения 183

— относительности 128

Ток

— переменный 48, 52

— Фуко 23

Трансформатор 57

Уравнение

— гармонических колебаний 38, 50

— Эйнштейна для фотоэффекта 147

Фаза колебаний 39

Формула

— Томсона 51

— тонкой линзы 90

Фотоаппарат 97

Фотоэффект 144, 147

Цвет 116

Частота колебаний 33

— циклическая 39

Экология 55, 175

Электромагнитная индукция 18

Элементарная частица 180, 182

Энергия

— атомная 174

— гармонических колебаний 36

— магнитного поля 25

— связи 170

— электрическая 54, 56

Ядерная реакция 168, 171

— деления 172

— термоядерная 176

Ядерные фотоэмульсии 185

Учебное издание

Серия «Сферы»

Белага Виктория Владимировна
Ломаченков Иван Алексеевич
Панебратцев Юрий Анатольевич

Физика

11 класс

Базовый уровень

Учебник

Центр развития углублённого и профильного образования,
функциональной грамотности, технологии и ИКТ-компетенций

Ответственный за выпуск *Н. В. Мелешко*

Редактор *В. В. Жумаев*

Художественный редактор *С. Г. Куркина*

Компьютерная вёрстка *Э. В. Ленчевской, Д. Ю. Герасимова*

Художественное оформление *О. В. Поповича, С. В. Ермолина,*
Э. В. Ленчевской, С. Г. Куркиной, И. В. Шорниковой, С. Н. Аминевой,
А. Г. Куркина, К. С. Бихтемирова, А. Г. Шишова

Дизайн обложки *О. В. Поповича, В. А. Прокудина*

Технический редактор *С. В. Китаева*

Корректор *Е. В. Барановская*

Подписано в печать 15.02.2022. Формат 84×108/16. Гарнитура SchoolBookCSanPin.
Усл. печ. л. 25,2. Уч.-изд. л. 17,80. Тираж экз. Заказ № .

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».
Российская Федерация, 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3,
этаж 4, помещение I.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — vopros@prosv.ru.